

Specificaties voor het toepassen van Noordse Leem in Weg- en Waterbouwwerken in Nederland

Inventarisatie

Gerard Kruse
Arjan Venmans

11201985-002

Titel

Specificaties voor het toepassen van Noordse Leem in Weg- en Waterbouwwerken in Nederland

Project

11201985-002

Kenmerk

11201985-002-GEO-0004

Pagina's

36

Trefwoorden

Noordse, leem, zwak zandige leem, low plasticity, grondwerken, steenbreker

Samenvatting

Het materiaal Noordse Leem is de fijnste gradering afkomstig van het breken van rots uit kwartsiet- en granietvoorkomens in Noorwegen, respectievelijk Schotland. Noordse Leem is homogene fijnkorrelige grond met een hoek van inwendige wrijving als van zand, een hoge volumieke massa en de doorlatendheid van verdichte klei. De eigenschappen van Noordse Leem maken het materiaal geschikt voor toepassing in functionele onderdelen van grondwerken in de weg- en waterbouw en het kan een aantrekkelijk alternatief zijn.

Dit rapport betreft een inventarisatie waarin:

- De relevante eigenschappen en de invloeden daarop voor deze toepassingen worden omschreven.
- Randvoorwaarden worden gegeven aangaande regelgeving, verwerken en functioneren in weg- en waterbouwwerken.
- Enige mogelijkheden worden gegeven voor specialistische toepassingen in de waterbouw en hergebruik.

De conclusie is dat toepassingen mogelijk zijn:

- In de waterbouw: in de kern en de berm van waterkeringen.
- In de waterbouw: als afdichting van voor- en achterland van waterkeringen.
- In de waterbouw: als waterbodemaafdichting.
- In de wegenbouw: als constructieve ophoging in weglighamen.
- In de woningbouw: als niet-constructieve ophoging in gebiedsophogingen en als geluidswallen.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	jun. 2019	ir. A.A.M. Venmans		drs. G.A.M. Kruse		ir. drs. J. van Ruijven	
				dr.ir. S.J.M. van Eekelen			

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
2 Samenvatting eigenschappen en toepassingen	2
2.1 Sterkte en vervorming	2
2.2 Klink	2
2.3 Doorlatendheid	2
2.4 Verwerken	3
2.5 Toepassingen	3
2.5.1 Berm voor waterkering	3
2.5.2 Kern van een waterkering	4
2.5.3 Voor- en achterland afdichting	4
2.5.4 Kwelbeperking	5
2.5.5 Weglichaam constructieve ophogingen	5
2.5.6 Gebiedsophogingen, geluidswallen, niet-constructieve ophogingen	5
2.5.7 Overige toepassingen	5
3 Eigenschappen van Noordse Leem	7
3.1 Algemeen	7
3.2 De Noordse Leem	7
3.2.1 Vaste stof	7
3.2.2 Bereiding en toeslagmiddelen	10
3.3 Classificatie	11
3.3.1 Invloeden van de samenstelling	11
3.3.2 Beoordelen van Noordse Leem	12
3.4 Enige geotechnische eigenschappen van Noordse Leem in weg- en waterbouwwerken en invloeden daarop	14
4 Randvoorwaarden bij gebruik van Noordse Leem	18
4.1 Algemeen	18
4.2 Functioneren van grond in grondwerken	18
4.2.1 Functionele onderdelen van weg- en waterbouwwerken	18
4.2.2 Noordse Leem in waterkeringen	18
4.2.3 Noordse Leem in wegen en gebiedsophogingen	18
4.3 Regelgeving over grond in en weg- en waterbouw	19
4.3.1 Achtergronden van bestaande richtlijnen en regelgeving	19
4.4 Geschiktheid van Noordse leem en ontbrekende kennis	20
4.4.1 Wegenbouw – rijkswegen	20
4.4.2 Wegenbouw – provinciale wegen	20
4.4.3 Wegenbouw – gemeentelijke wegen	21
4.4.4 Waterkeringen – kern en berm	21
4.4.5 Waterbouw – afdichtende lagen	21
4.4.6 Gebiedsophoging	23
4.5 Verwerken van Noordse Leem	23
4.5.1 Aanvoer en verwerken	23
4.6 Invloeden op eigenschappen	25
4.6.1 Plaats in het werk	25
4.6.2 Aspecten van de bereidingswijze	26

5 Toepassingen van Noordse Leem	27
5.1 Algemeen	27
5.2 Overzicht gerealiseerde toepassingen	27
5.2.1 Algemeen	27
5.2.2 Gerealiseerde toepassingen	28
5.2.3 Algemene bevindingen over verwerken van Noordse Leem	31
5.3 Toepassing van Noordse Leem gebaseerd op de eigenschappen ervan	31
5.3.1 Algemeen	31
5.3.2 Toepassingsmogelijkheden op basis van specifieke eigenschappen	31
5.3.3 Optimalisatie van ontwerp met Noordse Leem	33
6 Conclusies	34
6.1 Bevindingen	34
6.2 Aanbevelingen	34
7 Referenties	35
 Bijlagen	
A Toepassingen Noordse Leem	A-1
B Geschiktheid van Noordse leem	B-1
B.1 Wegenbouw – rijkswegen	B-1
B.2 Wegenbouw – provinciale wegen	B-2
B.3 Wegenbouw – gemeentelijke wegen	B-4
B.4 Waterkeringen – kern en berm	B-6
B.5 Gebiedsophoging	B-8
C Stabiliteitsberekeningen	C-1
C.1 Algemeen	C-1
C.2 Profiel I – toepassing van zand	C-2
C.3 Profiel I – toepassing van Noordse leem in kern en steunberm	C-3
C.4 Profiel I – toepassing van Noordse leem alleen in de steunberm	C-4
C.5 Profiel II – toepassing van zand	C-5
C.6 Profiel II – toepassing van Noordse leem in kern en steunberm	C-6
C.7 Profiel II – toepassing van Noordse leem alleen in de steunberm	C-7
D Samendrukkingseigenschappen van Noordse leem en voorbeeldberekening	D-1
D.1 Resultaten samendrukkingproeven	D-1
D.2 Voorbeeld zettingsberekening	D-2
D.2.1 Proefvak	D-2
D.2.2 Zettingsberekeningen	D-3
D.2.3 Resultaten	D-5
D.3 In- en uitvoer zettingsberekeningen	D-7

1 Inleiding

Het materiaal Noordse Leem is de fijnste gradering afkomstig van het breken van rots uit kwartsiet- en granietvoorkomens in Noorwegen, respectievelijk Schotland.

Noordse Leem is homogene fijnkorrelige grond met een hoek van inwendige wrijving als van zand, een hoge volumieke massa en het heeft de doorlatendheid van verdichte klei. Het materiaal is zeer homogeen van samenstelling, de jaarproductie is meer dan 200.000 m³ en is vrij van verontreinigingen. De eigenschappen van Noordse Leem maken het geschikt voor toepassing in functionele onderdelen van grondwerken in de weg- en waterbouw en het kan dan een aantrekkelijk alternatief zijn. De uitvoering van werken met Noordse Leem is in hoofdlijnen hetzelfde als met natuurlijk afgezette grond.

Dit rapport is opgesteld in het kader van het faciliteren van de inzet van Noordse Leem in weg- en waterbouwwerken in Nederland. Het rapport betreft een inventarisatie waarin:

- De relevante eigenschappen en de invloeden daarop voor weg- en waterbouwtoepassingen worden omschreven.
- Randvoorwaarden worden gegeven aangaande regelgeving, verwerken en functioneren in weg- en waterbouwwerken.
- Enige mogelijkheden worden gegeven voor specialistische toepassingen in de waterbouw en hergebruik.

Dit rapport is opgesteld ter vervanging van het voorlopige rapport “Specificaties voor het toepassen van Noordse Leem in Weg- en Waterbouwwerken in Nederland, inventarisatie: Voorlopig” (Deltares, 2018).

In hoofdstuk 2 worden eigenschappen van Noordse Leem en toepassingsmogelijkheden samengevat.

Hoofdstuk 3 gaat in op de samenstelling van Noordse Leem en de invloeden daarvan op eigenschappen en classificaties voor grond. De hoofdstukken 4 en 5 geven randvoorwaarden voor het maken en functioneren van grondwerken met Noordse Leem, respectievelijk een overzicht van gerealiseerde toepassingen. Hoofdstuk 6 geeft de bevindingen uit het onderzoek en doet aanbevelingen ten aanzien van het vaststellen van de toepassingsmogelijkheden in GWW werken.

2 Samenvatting eigenschappen en toepassingen

Noordse Leem wordt steeds op dezelfde wijze uit dezelfde basisgesteenten gemaakt en is daarom relatief zeer homogeen van samenstelling. De variatie in eigenschappen bij levering is daarom slechts afhankelijk van het watergehalte bij levering. De eenmaal vastgestelde eigenschappen behoeven daarom slechts ter controle en eventuele verificatie bepaald te worden.

2.1 Sterkte en vervorming

De Noordse Leem heeft een hoge effectieve hoek van inwendige wrijving, vergelijkbaar met die van zand en de cohesie is, net als voor zand, zeer gering. Waarneming in het terrein en Torvane bepalingen wijzen voorshands op een aanmerkelijke toename van de ongeroerde sterkte met de tijd, vaak met 'aging' aangeduid. Uit grootschalige proeven met het storten van grind, stenen en zand op onder water gestorte Noordse Leem is gebleken dat er geen doorpersen van de aangebrachte materialen optreedt. In ondiep water gestorte 50 tot 100 mm steen drong maximaal tot 0,2 m in de Noordse Leem.

De sterkte-eigenschappen voor de thans in gebruik genomen rekenmethode voor dijken, het zogenaamde ongedraineerd rekenen, zijn nog niet vastgesteld. Uit de bepalingen van de zettingseigenschappen (Bijlage D) kan worden afgeleid dat na verloop van enige maanden de overconsolidatie van Noordse Leem relatief hoog is door actieve 'aging'.

De porositeit van Noordse Leem uit een 3 - 6 maanden oud stort dat niet is verdicht, is 3 - 4 % hoger dan die van verdicht ophoogzand. De in situ volumieke massa van Noordse Leem is even hoog als die van ophoogzand beneden de freatische lijn, ca. 2.000 kg/m³. Boven de freatische lijn is de in situ volumieke massa van de Noordse leem ca. 1.950 kg/m³. Noordse Leem is boven de freatische lijn zwaarder dan ophoogzand, vanwege het waterhoudend vermogen van de leem dat het gewicht beneden ongeveer 0,8 m – mv verhoogt.

Door de geringe korrelgrootte en de korreleigenschappen (geringe activiteit van het korreloppervlak) is verweken bij het aanbrengen mogelijk. Door de korrelvorm, de relatief lage porositeit en de toename van de sterkte in de tijd neemt de verwekingsgevoeligheid van Noordse Leem na aanbrengen af..

2.2 Klink

De gerealiseerde terreinophogingen met Noordse Leem wijzen erop dat de klink van voldoende ontwaterde en verdichte Noordse Leem zeer beperkt is, zoals in Bijlage D is vastgesteld. De klink van zeer nat aangebrachte Noordse Leem kan hoger zijn dan die van verdicht ophoogzand, maar uit praktijkproeven is gebleken dat in den natte verwerkte Noordse Leem weinig klinkt (zie Bijlage D).

2.3 Doorlatendheid

De specifieke doorlatendheid van Noordse Leem in verdicht aangebrachte vorm is zeer laag. Bij aanbrengen onder water wordt Noordse Leem verdicht door het gewicht van bovenliggende grond en door aandrukken met een kraanbak of anderszins zoals uit waarnemingen in het terrein en in grootschalige proeven is vastgesteld. Zonder verdichten na het storten onder water treedt er oppervlakkig afregenen van gronddeeltjes van kluiten plaats waardoor macroporiën tussen kluitjes worden gevuld en een laag onder water gestorte Noordse Leem ook zonder verdichten slecht doorlatend wordt.

2.4 Verwerken

De aangevoerde Noordse Leem dient voldoende ontwaterd te zijn om met courant materieel verspreid en verdicht (verkneed) te kunnen worden. Voorshands lijken het watergehalte en de volumieke massa een maat daarvoor te kunnen geven (watergehalte lager dan ca. 26 % en droge volumieke massa hoger dan circa 1,56 t/m³). Het is voor een stevig resultaat aan te bevelen de Noordse Leem in 0,2 m dikke lagen te verdichten waarbij een wals ingezet kan worden of een bulldozer.

Maatregelen om verhogen van het watergehalte bij transport en aanleg te voorkomen kunnen nodig zijn. Bescherming tegen infiltratie van neerslag (zoals dichtrijden, onder vershot aanleggen, afdekken bij transport) zijn nodig. Drogen aan de buitenlucht is effectief voor dunne (0,2 m) afwaterende lagen.

Met praktijkproeven zijn mogelijkheden en effecten van methoden voor verdichten en voor controle nagegaan.

De Noordse Leem loopt onder water enigszins uit. Er ontstaat daardoor ook zonder verdichtingsinspanning een laag waarin de grotere poriën grotendeels gevuld raken met fijn materiaal dat van het oppervlak van kluiten regent. Zulke grotere open poriën zijn wel aanwezig in dunne (< 0,4 m) niet verdichte klei onder water. De toplaag van Noordse Leem verweekt na enige tijd onder water zoals ook bij natuurlijke klei het geval is. Er ontstaat, net als bij gewone klei op de bodem van natuurlijke wateren met beperkte stroming, een microbiële mat die de grond bijeenhoudt, onder andere bestaande uit algen.

Uit grootschalige proeven met het storten van grind, stenen en zand op onder water gestorte Noordse Leem is gebleken dat er geen doorpersen van de aangebrachte materialen optreedt.

2.5 Toepassingen

De jaarproductie is meer dan 200.000 m³. Het materiaal is zeer homogeen van samenstelling en bevat geen puin, stenen, organische materialen of andere zulke verontreinigingen.



Figuur 2.1 Overzicht van het depot van Noordse Leem in de haven van Amsterdam, de hydraulische kraan geeft de schaal weer. Let op de steil afgegraven hoge wand in de Noordse Leem. Op de voorgrond zand van de brekerinstallaties

2.5.1 Berm voor waterkering

De hoge volumieke massa, met name boven de freatische lijn, beperkt de benodigde dikte, dan wel de breedte van de berm ten opzichte van die van ophoogzand. De lage doorlatendheid beperkt infiltratie in de ondergrond en daarmee lokale stijging van de poriewaterdruk door overslag.

2.5.2 Kern van een waterkering

De hoge effectieve hoek van inwendige wrijving maakt relatief steile taluds mogelijk, vergelijkbaar met die in ophoogzand. Vanwege de lage doorlatendheid van Noordse Leem zijn relatief steile binnentaluds mogelijk voor een geheel of deels, aan de buitenzijde, met Noordse Leem aangelegde kern.



Figuur 2.2 Noordse Leem in een boezemkade (Hooivaart, Akkrum). Op de achtergrond de grond die voor het afdekken van de Noordse Leem wordt gebruikt



Figuur 2.3 Noordse Leem in een terreinophoging (Roelofarendsveen)

2.5.3 Voor- en achterland afdichting

Door de lage doorlatendheid en de hoge volumieke massa is Noordse Leem geschikt voor afdichtingen tegen areale infiltratie. Zoals in voor- en achterland van dijken.

2.5.4 Kwelbeperking

Afdichting van waterbodems is effectief met Noordse Leem vanwege lage doorlatendheid, goede verspreiding over de waterbodem zonder grote interne poriën en hoge volumieke massa ten opzichte van klei en slib. Waar nodig vanwege hoge stroomsnelheid en sterkere golfwerking dient een afdeklaag aanwezig te zijn.



Figuur 2.4 Noordse Leem gebruikt voor afdichting van een zandwinput (Cuijk) – tijdens de aanleg

2.5.5 Weglichaam constructieve ophogingen

Bij een geschikt watergehalte bij het verdichten is er een hoge sterkte en beperkte klink. De stijfheid en de ontwikkeling van de stijfheid in de tijd blijkt in de praktijk hoog te zijn in overeenstemming met de uitkomsten van laboratorium samendrukkingsproeven (Bijlage D).

2.5.6 Gebiedsofhogingen, geluidswallen, niet-constructieve ophogingen

Bij een geschikt watergehalte bij het verdichten is er een hoog draagvermogen en beperkte klink. De hoge hoek inwendige wrijving maakt toepassing in geluidswallen met steile taluds mogelijk.

2.5.7 Overige toepassingen

Noordse Leem uit grondwerken kan hergebruikt worden als natuurlijke grond in grondwerken.

Voor het vestigen van een vegetatie op vlak terrein is aanbrengen van een toplaag, of vermenging van tenminste een toplaag met organisch materiaal nodig.

Bij hoge stroomsnelheden treedt erosie van het oppervlak van Noordse Leem op. Er kunnen net als bij veel kleisoorten 'gullies' en afslagranden in taluds ontstaan door oppervlakkig afstromen en door golfwerking aan open water indien de leem niet is afgedekt.



Figuur 2.5 Proeven met het groeien van gras op Noordse Leem. Op vlakke terreinen slaat gras goed aan na het mengen van enige organische grond in de toplaag

3 Eigenschappen van Noordse Leem

3.1 Algemeen

Noordse Leem wordt gemaakt van de fijnste fractie die vrijkomt bij het breken van massief vast gesteente en nat zeven. Het materiaal is fijn (silt en lutum met weinig fijn zand) en bestaat uit gesteentefragmenten- en mineraalkorrels. De lutumfractie bevat bijna geen kleimineralen, zoals gewone klei, maar bestaat uit zeer fijne korrels van de mineralen in het gesteente. Het materiaal wordt uit het spoelwater van zeven en breken geconcentreerd door flocculatie, en een hydrocycloon en wordt vervolgens met een kamerfilterpers ontwaterd. Het uitgeperste fijne materiaal wordt op een tot 15 m hoog stort in de open lucht opgeslagen en compacteert en droogt verder in daarbij.

De eigenschappen van de Noordse Leem in een werk worden bepaald door de bereidingswijze, door processen bij aanleg van een werk en met het verstrijken van de tijd in het werk. De eigenschappen bij levering van Noordse Leem worden bepaald door respectievelijk de vaste stofdeeltjes (mineraalkorrels), de flocculatie in het proceswater, de mate van compactie in de kamerfilterpers en de duur en intensiteit van de processen in het stort. Al deze factoren zijn steeds hetzelfde voor Noordse Leem. De eigenschappen in het werk worden na verloop van tijd bepaald door met name:

- De eigenschappen bij levering.
- De wijze van aanbrengen met de wijze en intensiteit van verdichten.
- Het verloop van de processen in het korrelskelet van de Noordse Leem in de tijd en afhankelijk van de plaats in de constructie, met name:
 - Verdere compactie.
 - Aaneengroeien van korrels.
 - Afbreken van de flocculant.

De tijd is een belangrijke parameter bij het aaneengroeien van de korrels en de afbraak van de flocculant. In de volgende paragrafen wordt op de verschillende elementen ingegaan.

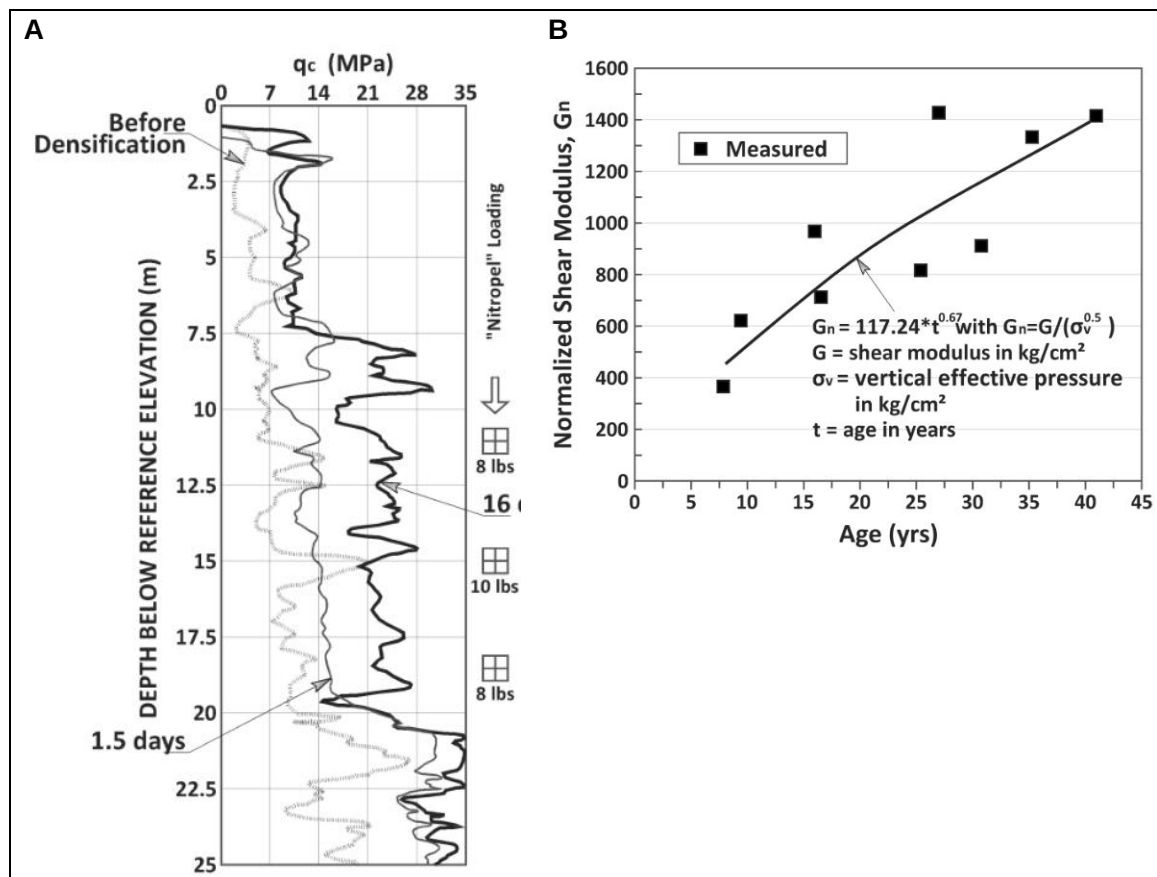
3.2 De Noordse Leem

3.2.1 Vaste stof

Noordse Leem is een natuurlijk materiaal afkomstig van het breken van niet verweerde kwartsiet- en granietgesteentemassa's. De vaste stofdeeltjes komen vrij bij het breken en zeven van graniet en een dichte kwartsiet uit groeves in respectievelijk Schotland en Noorwegen die zijn gekarakteriseerd in respectievelijk [12] en [18]. De graniet is een niet nader gespecificeerde graniet en de rots uit Noorwegen betreft een gemetamorfoseerde kalkhoudende zandsteen (grauwacke) gedomineerd door kwarts en veldspaat met calciet en wat leisteentefragmenten en overige mineralen. De grondstof bevat geen organisch materiaal, geen chlorides en bevat geen, of nagenoeg geen vrije kleimineraaldeeltjes (klei).

Het breken van vast massief gesteente verbreekt het kristalrooster van mineralen en de chemische contacten tussen de mineralen in het gesteente. Het oppervlak van de korrels reageert daardoor actief met water en de erin opgeloste stoffen en met de andere korrels op de korrelcontacten. Deze reacties leiden onder andere tot cementatie, aaneengroeien, van deeltjes, die sterker wordt met de tijd (zie Figuur 3.1 ter illustratie), wat vaak wordt samengevat onder de term 'aging' (of 'ageing'). De chemische en kristallografische veranderingen vormen deel van de verandering van grondmechanische eigenschappen in de tijd zoals die worden

besproken voor klei en zand (schijnbare preconsolidatie met lage kruipsnelheid) in bijvoorbeeld [1], [27], [36], [24] en Bijlage D en zoals die voor geologische tijdschalen leiden tot de vorming van hard gesteente uit losse grond. Zo neemt de sterkte van klei vaak met een factor van meer dan 2 toe in een periode van enige weken nadat het geroerd is geweest. Voor Noordse Leem is het niet waarschijnlijk dat de sterkte in die mate toeneemt, maar de aanwijzingen van het gedrag op het stort geven aan dat de toename significant is. Bepalingen van de stevigheid met een Torvane die een indicatie van sterkte geeft, gaven een sterkte-toename met een factor 1,5 voor een periode van enige maanden waarin het poriëngetal met slechts 2 % afnam.

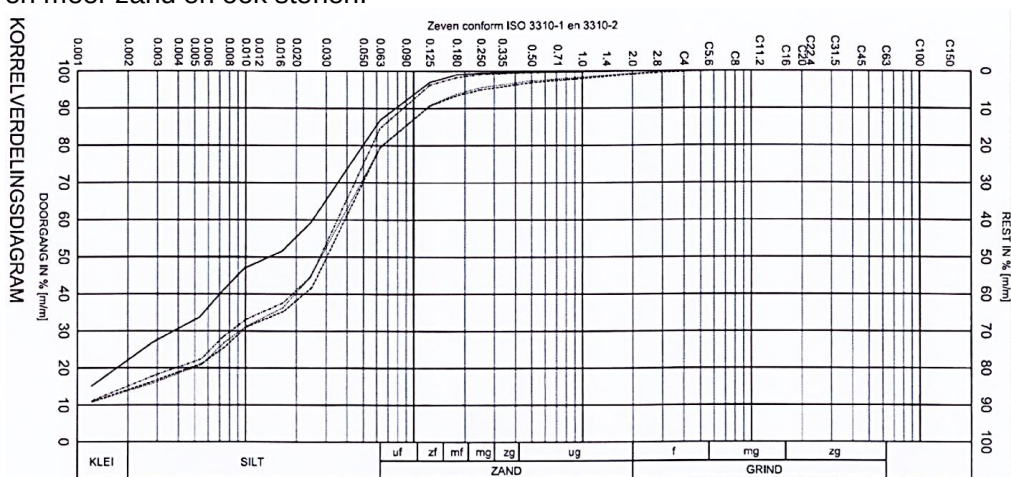


Figuur 3.1 A: Sondeerresultaten die het effect van tijd op korrelcontacten van opgespoten zand illustreren. Na explosieverdichting waarbij de grond verdicht (te zien aan de maaiveld daling), maar de stevigheid afneemt (daling van de conusweerstand, q_c) door het verbreken van korrelcontacten die in de loop van de tijd waren ontstaan, neemt de sterkte al binnen 16 dagen aanmerkelijk toe (hoge q_c) door de toename van binding op de korrelcontacten die het korrelskelet verstevigen (uit [33]). B: Toename over de jaren van de schuifstijfheid van fijnkorrelige mine tailings met lage plasticiteit, die net als Noordse Leem het resultaat zijn van het breken van gesteente (uit [33])

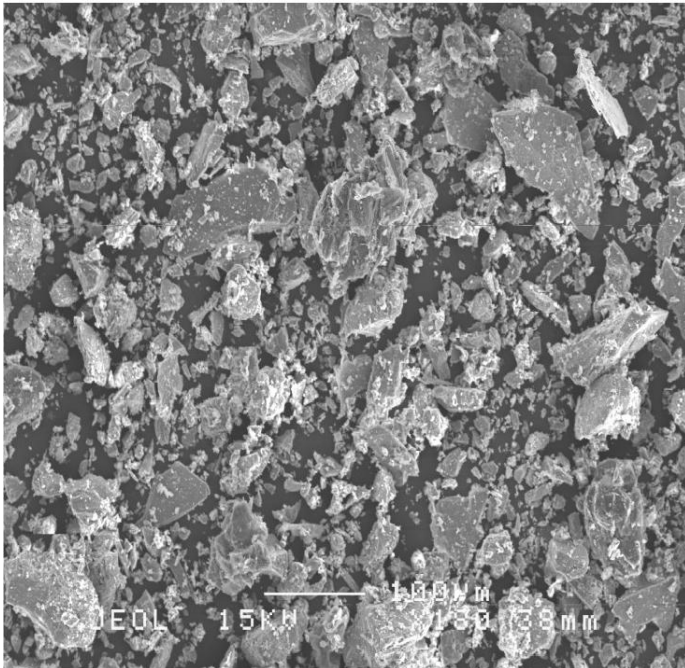
De fijne deeltjes van gebroken graniet en kwartsiet bestaan voor een groot deel uit kwarts en veldspaat, met kleinere hoeveelheden glimmers en overige mineralen ([12] en [18]). De gemiddelde massa dichtheid van de korrels van Noordse Leem van de grauwwacke is 2.720 kg/m³. De gemiddelde massa dichtheid van de korrels van enige monsters Noordse Leem uit het depot (17 januari 2018) bedroeg ook 2.720 kg/m³, zo'n 2 % hoger dan kwarts en veldspaat waaruit Nederlands zand grotendeels bestaat.

De korrelgrootteverdeling (zie Figuur 3.2) geeft aan dat de korrels in de Noordse Leem voornamelijk siltgrootte hebben met 10 % - 20 % lutumdeeltjes en 15 % - 20 % fijn zand. De korrels zijn zeer hoekig (zie Figuur 3.3) zoals dat voor fijnkorrelige grond in het algemeen het geval is. De lutumdeeltjes zijn geen kleimineralen, zoals in gewone natuurlijke klei, maar bestaan uit de mineralen waar het basisgesteente uit bestaat.

Noordse Leem wijkt in enige opzichten af van natuurlijke fijnkorrelige grondsoorten in Nederland. De korrelgrootteverdeling van natuurlijke leemsoorten, onder andere löss, heeft een duidelijke populatie (steil traject in de korrelgrootteverdelinggrafiek) in de grovere siltfractie met een variërende hoeveelheid lutum, welke fractie in natuurlijke leem wel voor een groot deel uit kleimineralen bestaat. De korrelgrootteverdeling van Noordse Leem is vergelijkbaar met sommige soorten keileem. Keileem bestaat voor een belangrijk deel ook uit vermalen gesteente, maar bevat daarnaast ook kleimineralen en, afhankelijk van de locatie, minder silt en meer zand en ook stenen.



Figuur 3.2 Korrelgrootteverdeling van Noordse Leem. De lutumfractie (geen fijne kleimineralen) bedraagt 10 tot 20 % en de zandfractie 15% tot 20 %



Figuur 3.3 Korrelvorm [13] van Noordse Leem deeltjes zichtbaar in een elektronenmicroscopopname. De witte streep onderaan de SEM opname is 0.1 mm lang, de fijnst zichtbare deeltjes zijn grove lutumdeeltjes (ca 2 μ m diameter) bij deze vergroting. Het materiaal is zeer hoekig, waarbij opgemerkt wordt dat de zeer fijne minerale deeltjes in natuurlijke grond eveneens zeer hoekig zijn

3.2.2 Bereiding en toeslagmiddelen

De Noordse Leem bestaat uit de fijne fractie die uit het spoelwater van zeven en breken is geconcentreerd en die daarna mechanisch is ontwaterd. Het ontwaterde materiaal wordt op een tot 15 m hoog stort in de open lucht opgeslagen en compacteert en droogt verder in daarbij. Het watergehalte van voor grondwerken geleverde Noordse Leem heeft bij aanbrengen op het stort een watergehalte van 25 tot 30 % en na enige maanden op het stort varieert het van 20 tot 26 %.

Er wordt een flocculant gebruikt om de fijne fractie uit het spoelwater te concentreren in grotere aggregaten, flocs, waardoor ze effectief met een hydrocycloon uit het water verwijderd kunnen worden. De flocculant die in het proces wordt gebruikt is steeds dezelfde geweest de afgelopen ongeveer 15 jaar, met minimale aanpassingen in samenstelling en dosering. De flocculant is een polymeer (polyacrylamide).

Flocculanten die gewoonlijk gebruikt worden voor indikking van mineraal slib beïnvloeden de mechanische eigenschappen van het slib. Voor de Noordse Leem wordt thans EcoPure P1715 gebruikt, een anionische poly-elektrolyet polymeer geleverd door Melspring. Om de invloed van de flocculant op de eigenschappen van Noordse Leem te kunnen beoordelen is inzicht in de samenstelling en lange termijngedrag van EcoPure P1715 nodig. In deze paragraaf wordt daar kort op ingegaan.

De gebruikte polymeer is geselecteerd met een optimalisatie naar snelheid van bezinken en transparantie van het effluent voor de bij Graniet Import gebruikte installatie met relatief zeer hoge turbulentie. De gebruikte kamerfilterpersen kunnen het materiaal met EcoPure P1715 voldoende ontwateren om het materiaal in een stort met relatief steile hellingen op te slaan (het stort heeft hellingen steiler dan 1:2 over een hoogte van meer dan 10 m, tot bijna loodrecht na enige maanden na afgraven).

Met onderzoeken elders naar gedrag en omzetting van polyacrylamide die wordt gebruikt als flocculant bij steenbrekerinstallaties, is aangetoond dat de lange polymeren in de grond worden omgezet tot kortere polymeren en dat het aantal actieve groepen aan de polymeren langzaam afneemt. Omzetting in de bovengrond (bovenste decimeters tot 1 m) is snel, tot meer dan 10 % per jaar, maar is dieper in de grond een traag proces en een relevante omzetting in een grondlichaam vergt tenminste tientallen jaren. Uitloging van polyacrylamide uit grond is nagenoeg nihil.

Het effect van de flocculant op de civieltechnische eigenschappen van Noordse Leem betreft een aantal mechanismen.

De polyacrylamide bindt het merendeel van de deeltjes en is dus aanwezig op en tussen bijna al de deeltjes. Daardoor is het deels door de polymeerketens gedragen korrelskelet van de Noordse Leem meer flexibel en plastisch dan zonder de lange ketens. Dit uit zich onder andere bij verknedend en in een voor zogenaamde 'low plasticity' leem relatief erg lage erosiesnelheid.

Het effect van polymeren op geotechnische grondeigenschappen is voor geconsolideerd fijnkorrelig materiaal met een lage plasticiteit, zoals Noordse Leem, onderzocht in diverse bronnen (onder andere [27]). Uit de verschillende onderzoeken komt naar voren dat bij gelijke porositeit de stevigheid (pieksterkte, samendrukbaarheid, stijfheid) van met polyacrylamide behandelde grond hoger is dan die van niet behandelde grond en dat de doorlatendheid wat lager is.

Compactie tot dezelfde porositeit vergde voor behandelde grond wel een meer dan 1.5 x hogere belasting dan voor niet behandelde grond. De porositeit van met flocculant behandelde grond is daardoor wat hoger dan van niet behandelde grond. Het effect van de hogere porositeit uit zich ook in indicaties in triaxiaalproeven voor een enigszins verhoogde gevoeligheid voor verweken van natte leem. Dit aspect komt bij het verwerken van Noordse Leem naar voren als het een hoog watergehalte heeft.

Het effect van de flocculantpolymeren neemt af als de ketens in de loop der tijd tot kortere segmenten worden afgebroken. De mate van chemische binding tussen de deeltjes, de 'aging' neemt toe in de loop der tijd. De onderlinge verhouding tussen 'aging' en afbraak van de flocculant en de daaruit resulterende eigenschappen zijn niet in laboratoriumomstandigheden voldoende te simuleren en kunnen alleen in toepassingen in werken worden nagegaan. Uit gerealiseerde werken in Nederland en elders komen geen aanwijzingen dat dergelijke materialen significant aan sterkte winnen dan wel verliezen in de loop der tijd.

3.3 Classificatie

3.3.1 Invloeden van de samenstelling

In Nederland wordt grond voor een weg- en waterbouwtoepassing in de praktijk in eerste instantie beoordeeld op korrelgrootteverdeling (Noordse Leem is een zwak zandige leem NEN 5104, [26]) en vaak ook op Atterbergse grenzen (Noordse Leem is een 'low plasticity clay', CL). De achtergrond voor het gebruik van korrelgrootteverdeling en plasticiteit voor de beoordeling is dat deze samenhangen met de verschillende invloeden op mechanische eigenschappen, hetgeen voor de meeste soorten grond in de ondiepe ondergrond meest het geval is. Noordse Leem is een natuurlijk materiaal afkomstig van het breken van niet verweerd kwartsiet- en granietgesteentemassa's. De zeer fijne fractie heeft een ander effect op de sterkte en vervormingseigenschappen dan een groot deel van de gebruikelijke klei en leem in de ondiepe

ondergrond van Nederland. Noordse Leem heeft daarom fysische eigenschappen die deels afwijken van gewone Nederlandse klei en leem. Door de fijnheid van de korrels zijn de poriën klein en is de waterdoorlatendheid zeer beperkt.

In natuurlijke grond bestaat de zeer fijne fractie voor een groot deel uit kleimineraaldeeltjes die een relatief hoge en variabele oppervlaktelading en een hoge affiniteit voor water hebben. Bovendien hebben de kleimineraal deeltjes een vorm, zeer dunne plaatjes, waardoor natuurlijke klei een groot specifiek oppervlak heeft (1 gram kleigrond heeft een korreloppervlak van 50 tot 150 m²). Met deze eigenschappen bewerkstelligen de kleimineraaldeeltjes met de andere fijne deeltjes een korrelskelet dat zeer open is en dus een hoge porositeit heeft. De fijne deeltjes van de Noordse Leem bestaan voornamelijk uit kwarts, veldspaat en geringe hoeveelheden andere mineralen. De deeltjes van Noordse Leem hebben een beperkte affiniteit voor water, hebben een lage oppervlaktelading en een beperkt specifiek oppervlak en vormen daardoor een veel minder open korrelskelet dan gewone klei (zie Tabel 3.1). De gemiddelde specifieke massa van de minerale korrels van Noordse Leem is hoger dan 2700 kg/m³, hoger dan ca. 2.640 kg/m³ van kwarts.

	Klei	Zand	Noordse leem
poriënvolume	60 %	39 %	43 %

Tabel 3.1 Het poriënvolume van representatieve klei en zand en van Noordse Leem

Aangezien de samenstelling van Noordse Leem wordt gedomineerd door andere mineralen dan fijnkorrelige Nederlandse grond en omdat er een flocculant in is verwerkt, hebben de korrelgrootte en plasticiteit ervan andere relaties met het mechanisch gedrag in weg- en waterbouwwerken. De courante bestaande classificatieschema's geven dan ook een beperkt beeld van de eigenschappen van Noordse Leem voor civieltechnische toepassingen. De bepaling van de plasticiteit van grond met Atterbergse grenzen betreft het vaststellen van een mechanische eigenschap, en wel het vaststellen van het watergehalte waarboven de grond gaat vloeien en waar beneden de grond bros is. Deze indeling is daarom nuttig voor het vaststellen van de verwerkbaarheid van grond die met het watergehalte samenhangt. Uit de praktijkervaringen tot nu toe lijkt de voor verwerkbaarheid van klei het gebruik van de Atterbergse grenzen niet in overeenstemming gebracht te kunnen worden met het gedrag van Noordse Leem in een werk. Vanwege de homogeniteit van Noordse Leem is daarom op basis van de ervaring in de praktijk gekozen voor het vastleggen van normen gebaseerd op watergehalte en droge volumieke massa.

Het breken, zeven en spoelen van het gesteente bij Graniet Import en het ontwateren van de fijne fractie tot Noordse Leem volgt een gestandaardiseerde procedure. Aangezien het verwerkte gesteente steeds eenzelfde samenstelling heeft (graniet en metamorfe kalkhoudende kwartsiet) is de variatie in samenstelling en korrelgrootteverdeling van de korrels ook zeer beperkt. De variatie in samenstelling en eigenschappen van de resulterende Noordse Leem die voor grondwerken geleverd wordt, is daardoor ook beperkt en de relevante variatie betreft slechts de verschillen in watergehalte. Voor verwerken en verdichten voldoet Noordse Leem ruim aan de voorwaarden waar de eis voor gesteld wordt bij een watergehalte lager dan 26 % en een droge volumieke massa van tenminste 1,56 t/m³.

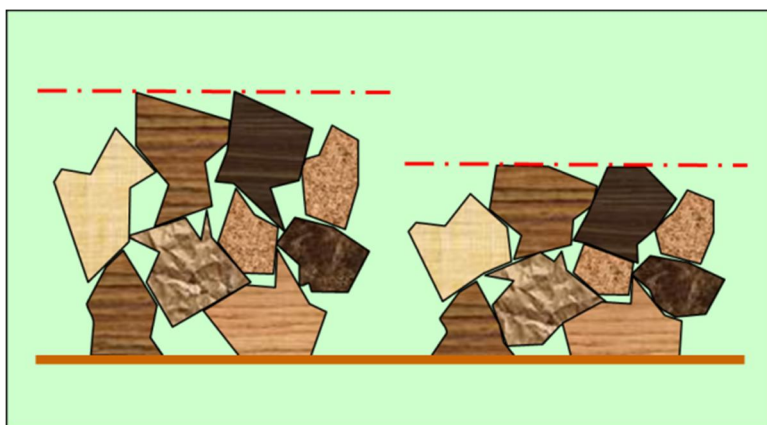
3.3.2 Beoordelen van Noordse Leem

De classificatie van Noordse Leem met classificatieschema's voor natuurlijke fijnkorrelige grond geven om de in paragraaf 3.3.1 genoemde redenen geen nauw omschreven indicatie van de civieltechnische eigenschappen. De classificatieschema's voor natuurlijke fijnkorrelige grond zijn daarom in veel opzichten beperkt geschikt voor het bepalen van variatie in

mechanische eigenschappen van Noordse Leem. Anderzijds bestaat er ook geen noodzaak voor nadere classificatie van Noordse Leem, omdat de samenstelling ervan, behalve volumieke massa en watergehalte, slechts binnen zeer beperkte marges varieert. De variatie in eigenschappen van Noordse Leem wordt bepaald door het watergehalte en volumieke massa. De karakteristieke eigenschappen van Noordse Leem blijken uit de verzamelde laboratoriumbepalingen ervan en uit de ervaring bij aanleg en functioneren in weg- en waterbouwwerken. Het bepalen van de volumieke massa en het watergehalte van te leveren Noordse Leem volstaat daarom om een goede indicatie van de eigenschappen ervan in een werk te verkrijgen.

Voor het verwerken in grondwerken is het nodig dat er op het vers aangebrachte materiaal gereden kan worden en dat het voldoende verdicht kan worden. Vanwege de homogeniteit van Noordse Leem is op basis van de ervaring in de praktijk gekozen voor het vastleggen van eisen gebaseerd op watergehalte en droge volumieke massa. Voor verwerken en verdichten voldoet Noordse Leem ruim aan de voorwaarden waar de eis voor gesteld wordt bij een watergehalte lager dan 26 % en een droge volumieke massa van $1,56 \text{ t/m}^3$. Regelmatige controle op de aangehouden standaardwaarden is nodig om eventuele ongewenste insluiting van te natte partijen te voorkomen.

Noordse Leem krijgt de gewenste eigenschappen van hoge sterkte en stijfheid na verloop van enige tijd en de zeer lage doorlatendheid door verdichting die in het werk optreedt, al dan niet door apart verdichten. Het verdichten van fijnkorrelige grond met materieel betreft het aaneenkneeden van de kluiten van de grond, zodanig dat de lucht en het water uit de ruimte tussen de brokken grond worden geperst (zie Figuur 3.4). De brokken zelf kunnen bij het aanbrengen en verdichten met materieel niet verdicht worden omdat water en gassen daar niet uitgeperst kunnen worden vanwege de te fijne poriën. Voor het vaststellen van de mate van verdichting van fijnkorrelige grond is de voor loskorrelig materiaal veel toegepaste proctorproef niet geschikt [6]. Dit geldt ook voor Noordse Leem. De mate van verdichting dient daarom uit de mate van de verdichtingsinspanning te worden bepaald [6], zoals ook wordt voorzien voor klei in dijken.



Figuur 3.4 Het verdichten van fijnkorrelige grond betreft het aaneen persen van kluiten grond, zoals in deze illustratie voor kleigrond is geschetst

Noordse Leem in een grondwerk kan hergebruikt worden omdat de grond weliswaar op den duur sterkte wint, maar niet versteent en zich bij vergraven weer als grondmassa gedraagt.

3.4 Enige geotechnische eigenschappen van Noordse Leem in weg- en waterbouwwerken en invloeden daarop

Noordse Leem is een zwak zandige leem, een fijnkorrelige stevige grond met een relatief hoge volumieke massa, als zand, en een lage doorlatendheid, als verkneede verdichte klei. In Tabel 3.3 zijn ter indicatie enige waarden voor geotechnische parameters gegeven.

De volumieke massa van Noordse Leem is relatief erg hoog voor fijnkorrelige grond. De relatief hoge waarden zijn het gevolg van de samenstelling van de fijne fractie die niet uit kleimineralen en gerelateerde organische stof bestaat, maar uit fijne hoekige gesteentekorrels. De specifieke massa dichtheid van de korrels bedraagt 2.720 kg/m³ voor een aantal monsters uit depot. Ter vergelijking: voor Nederlands kwartszand wordt 2.640 kg/m³ aangehouden. Tabel 3.2 geeft gemeten waarden voor de porositeit, watergehalte en volumieke massa's van Noordse Leem in het stort.

monster	hoogte + NAP [m] (depotkruin ca. 10 m +NAP)	diepte - bovenkant depot [m]	volumieke massa nat [t/m ³]	volumieke massa droog [t/m ³]	watergehalte [% M/M]	verzadigingsgraad [V/V %]	torvane waarde	ouderdom bij monstername	globale representatief geachte ouderdom bij monstername [mnd]	porositeit [N]
id	[m +NAP]	[m]	[t/m ³]	[t/m ³]	[%]	[%]	[kg/cm ²]	[maanden]	[maanden]	
1	8,5	1,5	1,952	1,514	28,90	98,69		0	0,2	0,44
2	8,2	1,8	1,961	1,523	28,80	99,65		1	0,5	0,44
3	3,3	6,7	1,985	1,589	24,94	95,26	2,8	4 - 6	5	0,42
4	2,0	8,0	1,992	1,583	25,81	97,79	3,2	4 - 6	5,5	0,42
5	4,5	5,5	1,990	1,593	24,92	95,99	3,6	4 - 5	4,5	0,41
6	5,8	4,2	1,994	1,589	25,44	97,29	5,6	3 - 4	3,5	0,42

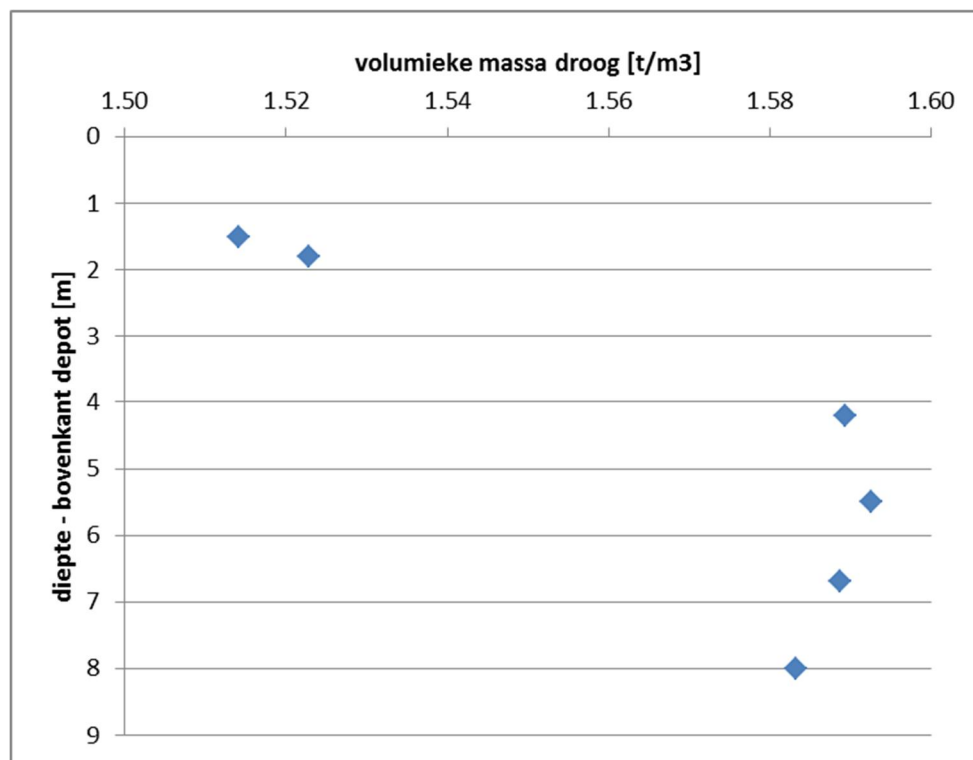
Tabel 3.2 Watergehalte, volumieke massa, porositeit en verzadigingsgraad van monsters van het stort van Noordse Leem

Door de hoge dichtheid en de zeer hoekige korrels van alle deeltjes heeft Noordse Leem een hoge hoek van inwendige wrijving ϕ' . De cohesie van het materiaal is laag zoals uit de triaxiaalproeven naar voren komt, als gevolg van de afwezigheid van kleimineralen en organische stof. De flocculant in het materiaal, die de deeltjes bij de flocculatie bijeen bindt (zie paragraaf 3.2.2), heeft een beperkte invloed op het vervormings- en bezwijkgedrag.

De samendrukbaarheid van het materiaal is zeer laag in vergelijking met klei en kleiige grond. De porositeit van Noordse Leem is slechts zo'n 3 % hoger dan van gemiddeld ophoogzand. De

samendrukbaarheid van de Noordse Leem, met flocculant is relatief hoog ten opzichte van het materiaal zonder polymeer. Met het afbreken van de polymeer in de loop van jaren tot vele tientallen jaren (afhankelijk van de omstandigheden) neemt het relatief beperkte effect ervan op de sterkte af, zoals gesteld in paragraaf 3.2.2). De binding tussen de deeltjes neemt echter toe door de toename van de chemische cementatie tussen de deeltjes zoals in paragraaf 3.1 is beschreven. De bevindingen met gerealiseerde werken wijzen erop dat op de termijn van enige jaren de sterkte na aanbrengen toeneemt.

De mechanische belasting van het materiaal in een werk heeft ook invloed op de ontwikkeling van de sterkte ervan. Bij hoge belasting (dieper in het werk) neemt door compactie de sterkte ervan toe, zoals ook uit de uitgevoerde triaxiaalproeven naar voren komt [10]. Figuur 3.5 geeft de volumieke massa zoals gemeten op verschillende diepten in het depot van Graniet Import in Amsterdam. Ook hieruit blijkt dat dieper in het depot compactie is opgetreden.



Figuur 3.5 Volumieke massa in het stort van ongeveer 10 m hoog. De lage massa waarden, ca. 1,52 t/m³, zijn van Noordse Leem die enige weken daarvoor is gestort

Parameter	Gemiddelde waarde	Lage waarde	Hoge waarde	Opmerking
volumiek gewicht, γ_{nat} [kN/m ³]	19	18	20	hoog voor fijnkorrelige grond
watergehalte bij levering, w_n [% m/m]	25	18	29	relatief grote invloed op eigenschappen bij en na verdichten
korrelmassa [kg/m ³]	2.710	2.660	2.725	lage waarde is gebaseerd op samenstelling van graniet, hoge waarde is gemeten
hoek van inwendige wrijving, ϕ [°], multistage CIUC, 2% rek	33	30	34	Vergelijkbaar met ophoogzand en hoog voor fijnkorrelige grond
cohesie, c' [kPa], multistage CIUC, 2% rek	0	0	2	Vergelijkbaar met ophoogzand
specifieke doorlatendheid [m/s]	7×10^{-9}	5×10^{-9}	1×10^{-8}	Vergelijkbaar met verdichte klei
zandgehalte [% m/m]	18	15	20	
lutumgehalte [% m/m]	18	10	20	
vloeigrens [% m/m]	33	28	36	De test op Noordse Leem is zeer gevoelig voor de uitvoering
uitrolgrens [% m/m]	22	18	24	De test op Noordse Leem is zeer gevoelig voor de uitvoering
plasticiteitsindex [% m/m]	11	9	12	

Tabel 3.3 Indicatieve waarden voor enige geotechnische parameters van Noordse Leem. Het aantal bepalingen bedraagt 3 of 4 voor de meeste parameters [10], [12], [11], [13], [36]

De verandering van de stevigheid van Noordse Leem in de tijd is nog niet kwantitatief met het monitoren van uitgevoerde werken vastgesteld.

Het effect van 'non plastic fines', zoals de deeltjes van Noordse Leem, op verweken van grond is bekend uit de literatuur. Het effect hangt samen met de invloed op het porievolume van grond van fijne deeltjes met weinig onderlinge binding [24] en [27]. De polymeer in Noordse Leem en het voor leem beperkte porievolume van Noordse Leem, beperken het effect van de 'non plastic fines' op verwekingsgevoeligheid echter in hoge mate. Het effect wordt verder beperkt als de leem voldoende compact is. Het watergehalte bij aanbrengen en verdichten, verknedden, dient daarvoor voldoende laag te zijn (lager dan ca. 26 %).

De sterkte van de directe binding tussen de inerte deeltjes is direct na verwerken en verdichten beperkt, maar de flocculant in Noordse Leem zorgt voor een flexibele binding tussen de deeltjes. Noordse Leem toegepast onder water heeft daardoor een bestendigheid tegen erosie

door langsstromend water die relatief hoog is voor 'low plasticity clay' (CL in het Atterberg diagram).

In paragraaf 3.2.2 is beschreven dat de afbraak van de polymeer in de grond nabij het maaiveld hoog is. Bij de voortdurende omzetting van grond boven grondwaterniveau in de buitenste 1 tot 1,5 m van een grondlichaam door bioturbatie, watergehalteveranderingen en dergelijke, kan de flocculant na verloop van enige jaren in het geheel geen samenhang tussen de relatief inerte steenkorrels meer leveren. De erosiegevoeligheid van Noordse Leem neemt daardoor in de loop van enige jaren toe in de buitenste 0,6 m tot 1,0 m van een grondlichaam tot die van weinig erosiebestendige klei (categorie 3 in de in Nederland gebruikelijke indeling).

Indien er in waterbodentoepassingen geen bovenbelasting is, neemt de dichtheid van fijnkorrelige grond zoals klei en Noordse Leem af door bioturbatie en microbiële processen met effecten op stevigheid en erosiegedrag.

4 Randvoorwaarden bij gebruik van Noordse Leem

4.1 Algemeen

Dit hoofdstuk beschrijft de randvoorwaarden die gelden voor toepassing van Noordse leem:

- De eisen die gelden voor verschillende toepassingen.
- Kennisleemten.
- Mogelijkheden en aandachtspunten bij verwerking.
- Verandering van de eigenschappen in de tijd.

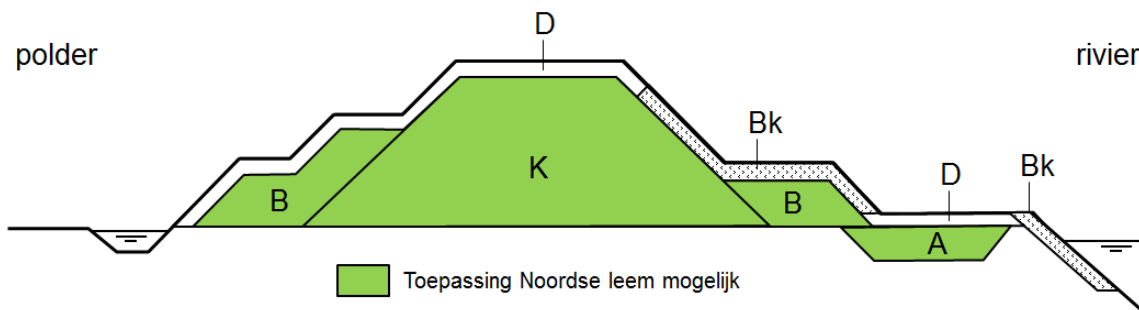
4.2 Functioneren van grond in grondwerken

4.2.1 Functionele onderdelen van weg- en waterbouwwerken

De toepassingsmogelijkheden van een materiaal hangen af van de eigenschappen van het materiaal én van de belastingen die het materiaal gedurende de levensduur ondergaat. De belastingen (mechanisch, chemisch/biologisch, vocht, temperatuur) worden bepaald door de plaats in de constructie. Om deze reden worden weg- en waterbouwkundige constructies opgedeeld in een aantal functionele onderdelen. Elk functioneel onderdeel heeft een specifieke functie met specifieke belastingen; aan elk onderdeel worden specifieke eisen gesteld die samenhangen met die belastingen.

4.2.2 Noordse Leem in waterkeringen

Figuur 4.1 geeft de constructie-onderdelen van een waterkering [30].



Figuur 4.1 Constructie-onderdelen van een waterkering

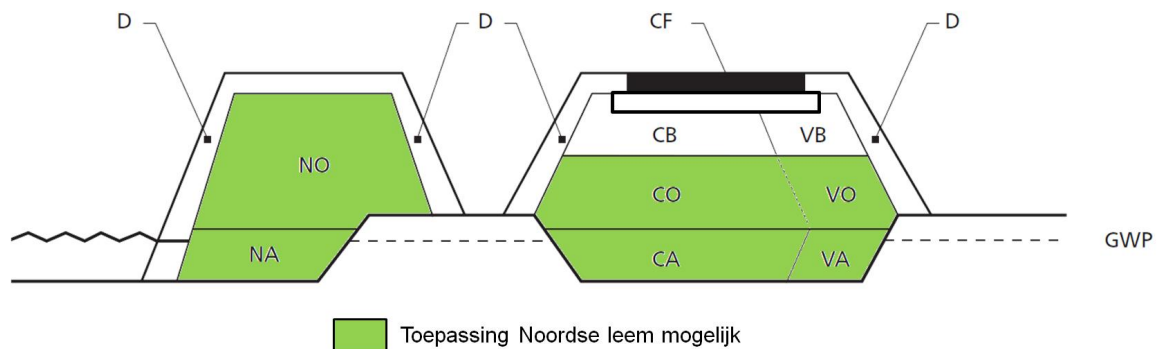
Hierin is:

- Bk = bekleding.
 K = kern.
 B = berm.
 D = deklaag of leeflaag.
 A = aanvulling voorland.

Toepassing van Noordse leem is in principe mogelijk in de constructie-onderdelen kern (K), berm (B) en (onderwater-) aanvulling van het voorland (A). De erosiebestendigheid is onvoldoende voor toepassing als deklaag (D). Paragrafen 4.4.4 en 4.4.5 geven verdere eisen aan de toepassing.

4.2.3 Noordse Leem in wegen en gebiedsophogingen

Figuur 4.2 geeft de constructie-onderdelen van een weg en een terreinophoging [4].



Figuur 4.2 Constructie-onderdelen van een weg (rechts) en gebiedsophoging of geluidswal (links)

Hierin is:

- CF = wegfundering.
- CB = belastingsspreidende laag.
- CO = constructieve ophoging.
- CA = constructieve aanvulling onder water.
- NO = niet-constructieve ophoging.
- NA = niet-constructieve aanvulling onder water.
- D = deklaag of leeflaag.
- VB = belastingsspreidende laag voor wegverbreding.
- VO = constructieve ophoging voor wegverbreding.
- VA = constructieve aanvulling onder water voor wegverbreding.

De niet-constructieve ophoging kan beperkt van omvang zijn zoals een geluidswal, of uitgestrekt zoals een gebiedsophoging.

Toepassing van Noordse leem is in principe mogelijk in de constructie-onderdelen constructieve ophoging (CO, VO), constructieve aanvulling onder water (CA, VA) in wegen, en in de constructie-onderdelen niet-constructieve ophoging (NO) en niet-constructieve aanvulling onder water (NA) van geluidswallen of gebiedsophogingen. Toepassing in de belastingsspreidende laag (CB, VB, 'zandbed') is niet mogelijk vanwege de lage stijfheid en de grote capillaire opstijging. De erosiebestendigheid is onvoldoende voor toepassing als deklaag (D). Paragrafen 4.4, 4.4.2 en 4.4.3 geven verdere eisen aan de toepassing.

4.3 Regelgeving over grond in en weg- en waterbouw

Bijlage B bevat een volledige vergelijking van de eisen aan verschillende toepassingen met de eigenschappen van de Noordse leem. Dit hoofdstuk geeft de samenvatting daarvan.

4.3.1 Achtergronden van bestaande richtlijnen en regelgeving

De 'Basisspecificatie Dijk' van Rijkswaterstaat [30] is verplicht voor toepassingen van materialen in alle onderdelen van waterkeringen. De Basisspecificatie is van toepassing op alle primaire en regionale waterkeringen in beheer bij waterschappen. De Basisspecificatie heeft betrekking op de civieltechnische eigenschappen van materialen.

De 'Eisen Onderbouw' van Rijkswaterstaat [30] zijn verplicht voor toepassingen van materialen in alle constructie-onderdelen van rijkswegen en bijbehorende constructieve toepassingen zoals gebiedsophogingen voor tankstations en verzorgingsplaatsen naast de rijksweg. De eisen zijn geformuleerd als prestatie-eisen aan de onderbouw, en eisen aan de

berekeningsmethoden. Zo wordt bijvoorbeeld een prestatie-eis gesteld aan restzetting van de hele onderbouw. Het is aan de ontwerper om deze eis te vertalen naar de klink van de toe te passen materialen. Behalve prestatie-eisen geven de 'Eisen Onderbouw' ook specifieke eisen voor een beperkt aantal materialen. De eisen hebben betrekking op het civieltechnische gedrag. Voor Noordse leem dient een materiaalspecifieke Toepassingsverklaring te worden aangevraagd via het RWS Steunpunt Wegenbouw en Geotechniek.

CROW-publicatie 281 'Zand in (constructieve) ophogingen en aanvullingen – richtlijn beoordeling van alternatieve materialen' [4] geeft eisen aan toepassingen van materialen in wegen en niet-constructieve toepassingen zoals geluidswallen en gebiedsophogingen. Gebruik van de richtlijn is vrijwillig. De richtlijn heeft betrekking op de civieltechnische eigenschappen van materialen.

4.4 Geschiktheid van Noordse leem en ontbrekende kennis

4.4.1 Wegenbouw – rijkswegen

Bijlage B.1 geeft een volledige vergelijking van de Eisen Onderbouw met de eigenschappen van Noordse leem. Dit leidt tot de volgende conclusies voor toepassing in Constructieve ophoging (CO) en Constructieve aanvulling onder water (CA):

- Noordse leem dient op de juiste wijze te worden aangebracht en verdicht. Paragraaf 4.5.1 geeft nadere aanwijzingen hiervoor.
- De sterkte van Noordse leem is ongeveer gelijk aan die van zand. Daarom zal vervanging van zand door Noordse leem nauwelijks invloed hebben op taludhellingen of ruimtebeslag van het ontwerp.
- Per geval dient te worden beoordeeld of aan de eisen aan restzettingsverschillen zal worden verdaan, door beschouwing van de kruip van Noordse Leem én de ondergrond.
- Formeel is er geen eis aan de dynamische elasticiteitsmodulus. Rijkswaterstaat verlangt wel dat de waarde waarmee in het ontwerp is gerekend, in het werk kan worden aangetoond.
- Rijkswaterstaat staat geen toepassing in wegverbredingen toe.

4.4.2 Wegenbouw – provinciale wegen

CROW 281 suggereert voor provinciale wegen dezelfde prestatie-eisen aan te houden als voor rijkswegen. CROW 281 geeft in Tabel 1.4a voor provinciale wegen een uitwerking van prestatie-eisen naar eisen aan het materiaal.

Bijlage B.2 geeft een volledige vergelijking van de eisen uit CROW 281 met de eigenschappen van Noordse leem. Dit leidt tot de volgende conclusies voor toepassing in Constructieve ophoging (CO) en Constructieve ophogingen voor wegverbreding (VO):

- Noordse leem dient op de juiste wijze te worden aangebracht en verdicht. Paragraaf 4.5.1 geeft nadere aanwijzingen hiervoor.
- De sterkte van Noordse leem is ongeveer gelijk aan die van zand. Daarom zal vervanging van zand door Noordse leem nauwelijks invloed hebben op taludhellingen of ruimtebeslag van het ontwerp.
- Per geval dient te worden beoordeeld of aan de eisen aan restzettingsverschillen zal worden verdaan, door beschouwing van de kruip van Noordse Leem én de ondergrond.
- De waarde van de dynamische elasticiteitsmodulus dient nader te worden bepaald en vergeleken met de eisen.

4.4.3 Wegenbouw – gemeentelijke wegen

CROW 281 geeft in tabel 1.4b voor gemeentelijke wegen een uitwerking van prestatie-eisen naar eisen aan het materiaal.

Bijlage B.3 geeft een volledige vergelijking van de eisen uit CROW 281 met de eigenschappen van Noordse leem. Dit leidt tot de volgende conclusies voor toepassing in Constructieve ophoging (CO) en Constructieve ophogingen voor wegverbreding (VO):

- Noordse leem dient op de juiste wijze te worden aangebracht en verdicht. Paragraaf 4.5.1 geeft nadere aanwijzingen hiervoor.
- De sterkte van Noordse leem is ongeveer gelijk aan die van zand. Daarom zal vervanging van zand door Noordse leem nauwelijks invloed hebben op taludhellingen of ruimtebeslag van het ontwerp.
- Per geval dient te worden beoordeeld of aan de eisen aan restzettingsverschillen zal worden verdaan, door beschouwing van de kruip van Noordse Leem én de ondergrond.
- De waarde van de dynamische elasticiteitsmodulus dient nader te worden bepaald en vergeleken met de eisen.

4.4.4 Waterkeringen – kern en berm

Bijlage B.4 geeft een volledige vergelijking van de eisen uit de Basisspecificatie Dijk [30] met de eigenschappen van Noordse leem. Dit leidt tot de volgende conclusies voor toepassing in kern en berm:

- Noordse leem dient op de juiste wijze te worden aangebracht en verdicht. Paragraaf 4.5.1 geeft nadere aanwijzingen hiervoor.
- De sterkte van Noordse leem is ongeveer gelijk aan die van zand. Daarom zal vervanging van zand door Noordse leem nauwelijks invloed hebben op taludhellingen of ruimtebeslag van het ontwerp.
- Optimalisatie van de toepassing van Noordse leem ten opzichte van zand is mogelijk door gebruik te maken van het hogere volumegewicht boven grondwater en de lage doorlatendheid. De optimalisatie moet per situatie worden uitgevoerd.
- Noordse leem voldoet aan de eisen voor categorie 3 klei volgens het TAW Technisch Rapport Klei voor dijken [34].

4.4.5 Waterbouw – afdichtende lagen

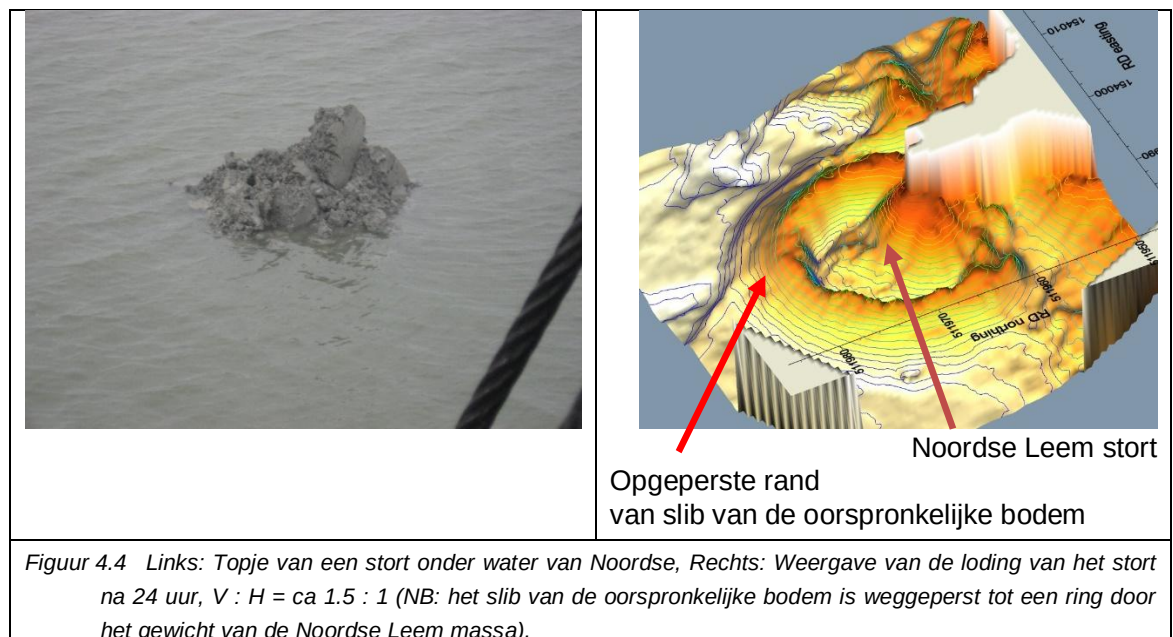
De 'Basisspecificatie Dijk' van Rijkswaterstaat [30] geeft geen eisen aan een aanvulling in het voorland. De zeer lage waterdoorlatendheid en de relatief hoge volumieke massa maken Noordse Leem een geschikt materiaal voor afdichtende lagen in voor- en achterland. Per toepassing zullen aanvullende eisen moeten worden geformuleerd voor verwerkbaarheid en verdichtbaarheid.

Opgemerkt wordt dat in praktijkproeven Noordse Leem bij storten onder water een stort met een hellingshoek van 1:2 tot 1:3 resulteert (zie Figuur 4.4).

Uit grootschalige proeven met het storten van grind, stenen en zand op onder water gestorte Noordse Leem is gebleken dat er geen doorpersen van de aangebrachte materialen optreedt. Stenen van 50 tot 100 mm drongen gemiddeld niet verder dan maximaal 0,2 m in de Noordse Leem.



Figuur 4.3 Een tijdelijke dam van Noordse Leem (Noordzeekanaal Amsterdam)



4.4.6 Gebiedsophoging

CROW 281 geeft in Tabel 1.4b een constructie-eis voor bouwrijp maken. Er is geen uitwerking naar eisen aan het materiaal gegeven.

Bijlage B.5 geeft een volledige vergelijking van de eisen uit CROW 281 met de eigenschappen van Noordse leem. Dit leidt tot de volgende conclusies voor toepassing in niet-constructieve ophogingen (NO) en niet-constructieve aanvullingen (NA):

- Noordse leem dient op de juiste wijze wordt aangebracht en verdicht. Paragraaf 4.5.1 geeft nadere aanwijzingen hiervoor.
- Per geval dient te worden beoordeeld of aan de eisen aan volumeverandering van het ophoogmateriaal en de zetting zal worden voldaan, door beschouwing van de kruip van Noordse Leem én de ondergrond.

De Noordse Leem vormt een zeer slecht doorlatende laag en kan voor het afsluiten van de ondergrond gebruikt worden.

4.5 Verwerken van Noordse Leem

4.5.1 Aanvoer en verwerken

Het depot van de Noordse Leem is gelegen aan een havenkade te Amsterdam met goede beladingsmogelijkheden voor grote en kleinere binnenvaartschepen. Aangezien het watergehalte van groot belang is voor de verwerking en de functionele eigenschappen van de Noordse Leem in grondwerken, is het van belang daar inzicht over te hebben bij het leveren.

Voor het verwerken in grondwerken is het nodig dat er op het vers aangebrachte materiaal gereden kan worden en dat het voldoende verdicht kan worden. Met de aanname over verwerkbaarheid in paragraaf 3.3.2 wordt daarom gesteld dat het watergehalte lager dan 26 % moet zijn en de droge volumieke massa hoger dan van $1,56 \text{ t/m}^3$.

Gezien het belang van het beperken van het watergehalte van Noordse Leem dient er bij transport geen water in de grond te komen. Het ruim, of laadbak, moet daarom worden afgedekt bij zowel kans op intense neerslag als bij varen met kans op overslaand water.

Noordse Leem verkrijgt de voor de hoge sterkte en stijfheid gewenste eigenschappen als het goed wordt verdicht en de doorlatendheid neemt bij verdichten verder af. Op basis van praktijkervaring met Noordse Leem en ervaring met het verwerken van klei dienen aan de volgende richtlijnen aangehouden te worden, te weten:

- Watergehalte lager dan 26 % en een droge volumieke massa hoger dan 1,56 t/m³.
- Laagdikte van aanbrengen voor verdichten ca. 0,2 m.
- Verdichten met 3 gangen met een D6 bulldozer met 0,6 m brede tracks, of equivalent.

Er kan worden nagegaan of verdichten met een wals tot meer efficiënte verdichting leidt.

Afhankelijk van de klinkgevoeligheid van het werk kunnen dikkere lagen voor het verdichten worden aangebracht indien er geen significante terreinhellingen zijn. De klink na het in den natte storten van 4 m Noordse Leem bedroeg zonder intensief verdichten minder dan 0,07 m in een praktijkproef (zie Bijlage D). Deze klink trad op in een tijdbestek van 1 à 2 weken.

Infiltratie van hemelwater en vrij kwelwater in het werk moet worden voorkomen. Om het watergehalte voldoende laag te houden moet het oppervlak van het werk altijd glad afgewerkt te zijn ingeval neerslag mogelijk is, teneinde infiltratie van hemelwater en sneeuwsmeelt te beperken. Het oppervlak van het werk dient daartoe ook afwaterend aangelegd te worden, steiler dan 1:10 tot 1:20. Voor zeer grote oppervlakken kunnen drainerende greppels (met glad afgewerkte wanden en bodem) worden aangelegd. Er mogen geen sporen van materieel in het oppervlak zijn waarin zich hemelwater kan verzamelen hetgeen met sporen in de richting van de terreinhelling wordt beperkt. Indien er toch water met de grond is vermengd kan deze niet meer verdicht worden en dient daarom apart gezet te worden om te drogen tot een watergehalte lager dan 26 %. Met drainage van het werk moet worden voorkomen dat vrij kwelwater en plassen van neerslag op en tegen de Noordse Leem komt te staan.



Figuur 4.4 Staand water op Noordse Leem in een terreinophoging: een omstandigheid die bij het verwerken van Noordse Leem te allen tijde vermeden moet worden, omdat de sterkte en samendrukbaarheid van Noordse Leem door een te hoog watergehalte verslechteren

Voor het verwerken van Noordse Leem bij werken onder water (waterbodemafdichting of ophogingen) is het van belang dat de grond aangebracht wordt zonder dat daarbij excessieve vertroebeling optreedt. Uit kolombezinkproeven met 0.4 m hoge kolommen is gebleken dat het bovenstaande water na bezinken binnen 2 dagen geheel helder was. Dit in tegenstelling tot de zelfde bezinkproef met Nederlandse klei waar na 2 dagen het bovenstaande water nagenoeg niet doorzichtig was. In de praktijk is gebleken dat vertroebeling zeer beperkt blijft als een kraanbak of grijper in zijn geheel ineens gelost wordt (zie ook Figuur 4.4). Het watergehalte kan daarbij hoger zijn dan 26 %, maar niet hoger dan 29 %. De Noordse Leem in kwelbeperkende toepassingen kan met een grijper onder water op de bodem worden geplaatst en zal daarbij enigszins verdichten tot een gesloten laag. Indien er geen eisen aan de stevigheid gesteld worden kan Noordse Leem met een voldoende hoog watergehalte verpompt worden.

Uit grootschalige proeven met het storten van grind, stenen en zand op onder water gestorte Noordse Leem is gebleken dat er geen doorpersen van de aangebrachte materialen optreedt. Stenen van 50 tot 100 mm drongen maximaal 0,2 m in de Noordse Leem.

Opgemerkt wordt dat Noordse Leem nagenoeg niet kleeft aan laadbakken en materieel en dat materieel en gereedschap gemakkelijk met water te reinigen is.

4.6 Invloeden op eigenschappen

Het poriënvolume van Noordse Leem en het watergehalte ervan bij het verwerken zijn belangrijke invloeden op de eigenschappen ervan. Deze factoren hebben invloed op het korrelskelet dat de sterkte en het vervormingsgedrag bepaalt. Met het verstrijken van de tijd neemt de sterkte en het aantal bindingen tussen de korrels toe. Ter vergelijking: de sterkte van klei neemt met een factor van meer dan 2 toe in een periode van enige weken nadat het geroerd is geweest. Voor Noordse Leem is het niet waarschijnlijk dat de sterkte in die mate toeneemt, maar de aanwijzingen van het gedrag op het stort geven aan dat de toename significant is (verschil in Torvane-waarde, indicatie van sterkte, bedraagt 1,5 voor een periode van enige maanden waarin het poriëntal met 2 % afnam).

Het watergehalte bij het aanbrengen is de belangrijkste variabele waarmee invloed uitgeoefend kan worden op de ontwikkeling van de eigenschappen. Daarna is de intensiteit van het verdichten de belangrijkste variabele voor de eigenschappen op termijn.

Opgemerkt kan worden dat Noordse Leem een vruchtbaar substraat kan zijn indien het wordt gemengd met geschikte compost.

4.6.1 Plaats in het werk

Beneden grondwater treden slechts zeer trage en beperkte veranderingen op behalve bij hoge belasting. Met een bovenbelasting van 5 m grond zou minder dan 3 % volumeafname optreden in de loop van de tijd als de grond goed verdicht is (gebaseerd op triaxiaalproefresultaten [8]). Bij niet goed verdichte grond kan op basis van samendrukkingsproeven op erg natte Noordse Leem tot 20 % compactie optreden bij een dergelijke bovenbelasting (gebaseerd op gegevens in [8]). Uit praktijkproeven met Noordse Leem voor grondverbetering bleek dat minder dan 5 % klink optrad bij werken in den natte (zie ook Bijlage D). Deze klink trad zeer snel op in een tijdbestek van 1 à 2 weken, voor een laagdikte van circa 1,5 m. Boven grondwaterniveau is de samendrukbaarheid van Noordse Leem zeer beperkt en neemt de sterkte aanzienlijk toe beneden 1 m beneden maaiveld. De gevoeligheid voor erosie van Noordse Leem neemt toe met de tijd in de onverzadigde zone in de bovengrond na het aanbrengen en wordt als die voor weinig erosiebestendige klei (categorie 3 in de in Nederland gebruikelijke indeling).

4.6.2 Aspecten van de bereidingswijze

Het is mogelijk in de bereidingswijze van Noordse Leem veranderingen aan te brengen waardoor de eigenschappen worden beïnvloed. Zulke veranderingen betreffen de keuze van de flocculant, de duur en druk bij het ontwateren in de kamerfilterpers en nadere conditionering van het verblijf in het stort, zoals bijvoorbeeld optimalisatie van drogen aan de lucht. Zulke veranderingen vergen ingrepen in de bedrijfsvoering waarbij er sprake is van onderlinge afhankelijkheden. De effecten van ingrepen moeten daarom experimenteel gevalideerd worden.

5 Toepassingen van Noordse Leem

5.1 Algemeen

Er is meer dan 1 miljoen ton Noordse Leem toegepast in een groot aantal grondwerken in Nederland sedert 2011 (zie Figuur 5.1). De werken hebben een omvang van enige duizenden tonnen tot meer dan 250 kton. De werken betreffen onder andere terreinophoging, verondiepingen, waterbodemafdichting, boezemkades, steunbermen, en tijdelijke kades en de paragraaf 5.2 geeft er een overzicht over. Voorzien wordt dat Noordse Leem ook in functionele onderdelen van hogere dijken kan worden toegepast. Paragraaf 5.3 gaat in op de mogelijkheden daarvan.



Figuur 5.1 Locaties van GWW werken waarin sedert 2011 Noordse Leem is toegepast. Eerder uitgevoerd werk betreft onder andere een ophoging van een deel van de A5

5.2 Overzicht gerealiseerde toepassingen

5.2.1 Algemeen

Gegevens en informatie over reeds uitgevoerde werken is van toepassing voor het beoordelen van het maken van GWW werken met Noordse Leem. Tabel 5.1 geeft een overzicht van sedert 2011 uitgevoerde werken. De ervaring bij het realiseren van de werken draagt bij aan het verkrijgen van overzicht over het werken met Noordse Leem.

5.2.2 Gerealiseerde toepassingen

Er zijn een aantal terreinophogingen gerealiseerd (zie Tabel 5.1). De Noordse Leem kon daarbij met het gangbare materieel, hydraulische kranen en bulldozers, verspreid worden. Indien de grond niet te nat is, voldoet de draagkracht voor kranen, bulldozers en dumpers.

De grond komt in grove plastische kluiten uit een dumper of kraanbak bij het lossen. De kluiten laten zich goed egaliseren en het verdichten met een bulldozer als bij kleigrond. De slipgevoeligheid van Noordse Leem is hoger dan die van natuurlijke klei en werken met materieel op een talud steiler dan 1:4 tot 1:5 kan alleen als de grond voldoende droog is. De gevoeligheid voor een te hoog watergehalte behoeft aandacht voor zowel draagkracht als voor eventueel slippen. Geconstateerd is dat bij het maken van een terreinophoging in een werk met vrij water in plassen op het terrein, de grond bij het verspreiden niet begaanbaar was voor kranen en bulldozers. De aangevoerde grond aldaar was pas na enige dagen drogen aan de lucht voldoende begaanbaar.

Noordse Leem is in de meeste gevallen verdicht met bulldozers, maar in sommige terreinophogingen is de grond verkneed en verdicht door versporend rijden met dumpers.

Er is aandacht nodig voor werken waar een talud in Noordse Leem gemaakt moet worden, zoals voor de kern van boezemkades, dijken en wegophogingen. Bij lage ophogingen is verdichten van een kort talud door aandrukken met een kraanbak uitgevoerd. Echter, de effectieve dieptewerking van deze wijze van verdichten is hooguit 0,1 m, waarmee rekening gehouden moet worden bij het aanbrengen van lagen op het talud. Hogere taluds waarvoor de constructieve stabiliteit van belang is, kunnen worden gerealiseerd door afgraven van een aangebrachte overmaat in breedte (zie ook het talud in het stort in Figuur 2.1 dat steiler dan 1:1 is). Voor het afdekken van een talud in Noordse Leem met een erosiebestendige kleilaag is het nodig een getrapt talud in de Noordse Leem te maken met treden met hoogte en breedte van ongeveer 0,4 tot 0,8 m, afhankelijk van de lengte en de steilte van het talud.

Er zijn op een aantal plaatsen waterbodems afgedicht met Noordse Leem. De grond in de betreffend werken is op de waterbodem geplaatst met een kraanbak. De grond is geschikt voor die toepassing vanwege de geringe doorlatendheid en omdat het onder water gemakkelijk enigszins uiteen zakt waarbij grotere openingen tussen kluiten worden gedicht. De Noordse Leem hoeft daarom niet altijd onder water verdicht te worden hetgeen voor klei wel het geval is om er een voldoende waterremmende laag mee te maken. De waterremmende werking van Noordse Leem functioneert kort na aanbrengen en ontstaat niet pas na het langzaam dichtslippen van de grotere openingen tussen kluiten zoals in natuurlijke klei. Er is geen langdurig sterke vertroebeling waargenomen bij het plaatsen van Noordse Leem onder water.

	Locatie van het werk	Jaar van uitvoeren	Opdrachtgever	Toepassing	Geleverde hoeveelheid [ton]	Tijd van het jaar	Weersomstandigheden
Westzaan Hoogtij	Westzanerpolder	2017		Ophoging / bouwrijp maken terrein	> 225.000	1e kwartaal	droog
GBT Over de Maas	Dreumel	2016		Verondieping zandwinput	125.000	-	-
De Deelen Deel 2 Akkrum	Akkrum	2016	Wetterskip Fryslan (Van der Wiel uitvoerder)	Boezemkade	120.000	Zomer	Droog
Kraaijenbergse plassen	Cuijk	2012-2016		Verondieping zandwinput	260.000	-	-
TAG West	Genemuiden	2012	De Waard BV	Ophoging / bouwrijp maken woonwijk	100.000	oktober	Nat
Luwtezone Windpark Westermeerwind	IJsselmeer	2012	Boskalis	Onderwaterberm in de luwte van een geleidedam	150.000	zomer	Nat en droog
Uitdam Marina resort	Uitdam	2012	Martens & Van Oord	Ophoging / bouwrijp maken	60.000	Zomer	Droog
De Oevers bouw - woonrijp maken	Roelofsarendsveen	2013	Boskalis	Ophoging / bouwrijp maken	50.000	Zomer	Nat en droog
Haarlemmervaart Westergasfabriek	Amsterdam	2013	Waternet	Waterdichte afsluiting kanaalbodem	30.000	1 ^{ste} kwartaal	Nat en droog
Hooivaart De Delen Deel 1	Tijnje, Friesland	2012	Wetterskip Fryslan	Boezemkade	15.000	herfst	Nat en droog
Legmeerdijk	De Kwakel, Uithoorn	2011	Waternet	Steunberm en onderbaan voor de Legmeerdijk	5.000	-	droog
Proefdijk IJlst	IJlst, Friesland	2011	Wetterskip Fryslan	Dijk	3.000	-	-
Danzigerkade	Amsterdam	2012	Port of Amsterdam	Tijdelijke oeverbescherming / afsluiting langs vaargeul + ophoging onder weg	3.000	-	droog
Beekbekleding Veluwe	Diversen			Beekbekleding	-	-	-

Tabel 5.1 Overzicht van gerealiseerde toepassingen van Noordse Leem sedert 2011.

5.2.3 Algemene bevindingen over verwerken van Noordse Leem

De aanvoer van Noordse Leem is voor de meeste gerealiseerde werken grotendeels per schip geweest. Lossen van de schepen met een kraan is eenvoudig omdat het materieel nagenoeg niet kleeft aan de bak.

Het materiaal is homogeen en er zijn bij het lossen en verwerken daarom geen ad hoc aanpassingen van werkwijze of in tempo van aanvoer.

Voor het verwerken op bestaand maaiveld is het gewenst dat er geen vrij water op aanwezig is. Eventueel kan vrij water verdreven worden door het dumpen van grote volumes grond ineens, maar daarbij kunnen problemen met begaanbaarheid ontstaan indien het water niet effectief verdreven wordt en in de Noordse Leem terechtkomt. De nat geworden grond dient dan weer verwijderd te worden.

In paragrafen 4.5, 4.6, en 5.2.2 is reeds gewezen op de noodzaak dat het watergehalte van de Noordse Leem lager dan 26 % en de volumieke massa hoger dan 1,56 t/m³ blijft. Hogere watergehalten veroorzaken diepe spoorvorming bij het verspreiden en verdichten en het heeft negatieve effecten op de constructieve eigenschappen.

Noordse Leem met een geschikt watergehalte is goed begaanbaar voor materieel en is goed glad af te werken met een wals of bulldozer. Bij frequent herhaald belasten, zoals bij een stationair werkende kraan treedt er enige verweking van de ondergrond op zoals dat ook bij natuurlijke klei, leem en keileem voorkomt. Bij het storten van Noordse Leem met een grijper of kraanbak is de natuurlijke rusthoek 1:1.5 – 1:2 in den droge en 1:2 – 1:3 in den natte.

Er is geen langdurig sterke vertroebeling waargenomen bij het plaatsen van Noordse Leem onder water.

5.3 Toepassing van Noordse Leem gebaseerd op de eigenschappen ervan

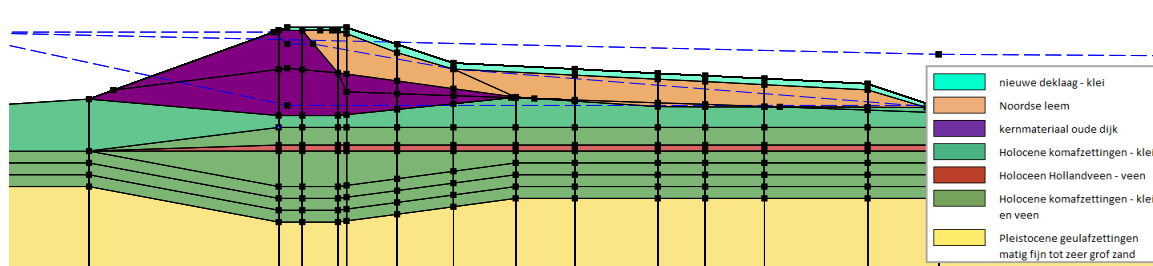
5.3.1 Algemeen

In deze paragraaf wordt aan de hand van een aantal voorbeeldberekeningen ingegaan op mogelijke toepassingen van Noordse Leem bij het verbeteren van dijken. De berekeningen gaan uit van bestaande dijken en er wordt nagegaan waar mogelijke optimalisaties zijn bij gebruik van Noordse Leem voor verbeteringen.

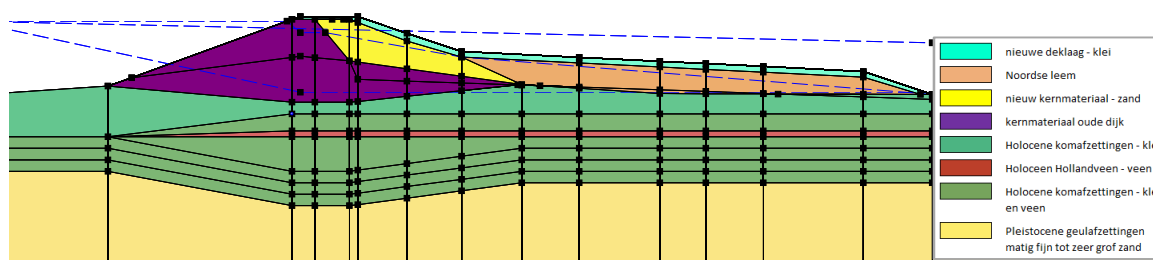
5.3.2 Toepassingsmogelijkheden op basis van specifieke eigenschappen

In verkennende berekeningen is toepassing van Noordse leem onderzocht in een tweetal profielen van rivierdijkversterkingen in het benedenrivierengebied (Figuur 5.2 en Figuur 5.3). In het profiel1 bestaat de ondergrond uit voornamelijk klei en bij profiel 2 is er een dikke veenlaag in de ondergrond.

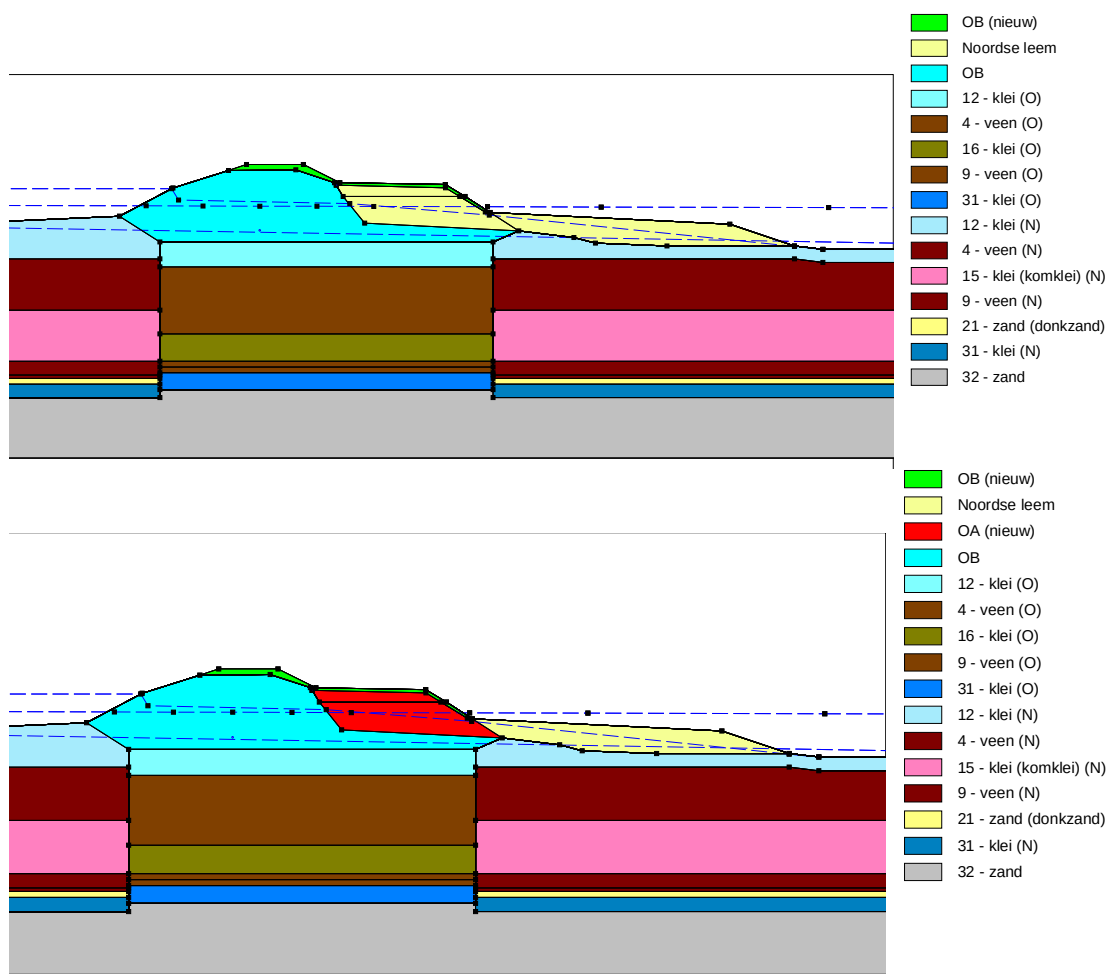
Bijlage C geeft de rapportage van de berekeningen zoals die door het rekenprogramma opgesteld wordt.



Figuur 5.2 Dijkprofiel benedenrivierengebied I. De Noordse leem (oranje) is toegepast in de kern en als steunberm (boven), en alleen in de steunberm (onder). De ondergrond bestaat uit voornamelijk klei



Figuur 5.3 Dijkprofiel benedenrivierengebied II. De Noordse leem (geel) is toegepast in de kern en als steunberm (boven), en alleen in de steunberm (onder). In de ondergrond is een dikke veenlaag aanwezig



Toepassing van Noordse leem in de kern én berm van de dijk leidt tot gelijke of iets lagere stabiliteit. De stabiliteitsfactor in profiel I is voor alle aanpassingen gelijk aan die bij toepassing van zand (Bijlage C.3). In profiel II is de stabiliteitsfactor ca. 2% lager dan bij toepassing van zand (Bijlage C.6). Dit komt omdat het hogere gewicht van de Noordse leem een hogere belasting geeft in het aandrijvende (linker) deel van het bezwijkmechanisme. Het hogere gewicht van de Noordse leem in de steunberm zoals die ontworpen was is niet voldoende om dit te compenseren in de stabiliteitsfactor.

Toepassing van Noordse leem in de berm alleen leidt tot gelijke of hogere stabiliteit. De stabiliteitsfactor in profiel I is ca. 1% hoger dan bij toepassing van zand (Bijlage C.4). Bij profiel II is de stabiliteitsfactor hetzelfde (Bijlage C.7).

Toepassing van Noordse leem in plaats van zand is mogelijk zonder grote aanpassing van het ontwerp. Noordse leem is boven grondwater zwaarder dan zand en heeft een lagere doorlatendheid. Dit leidt in de hier gepresenteerde verkennende berekeningen niet tot belangrijke besparingen in taludhelling, ruimtebeslag of hoeveelheid materiaal. De volgende paragraaf geeft aan onder welke omstandigheden een optimalisatie mogelijk is die recht doet aan de eigenschappen van Noordse leem.

In Bijlage D zijn de resultaten van samendrukkingsproeven op Noordse Leem opgenomen. Het materiaal is stijf en slecht doorlatend. Bijlage D geeft ook een voorbeeld berekening op basis van metingen aan een praktijkproef voor een grondverbetering. De gemeten zettingen voor in den natte verwerkte Noordse Leem zijn hoger dan de op basis van de zettingsparameters uit de samendrukkingsproeven berekende waarden. De klink van de Noordse leem bereikt na korte tijd bijna de eindwaarde. Dit volgt ook uit de zettingsberekeningen.

5.3.3 Optimalisatie van ontwerp met Noordse Leem

Optimalisatie kan zich richten op de volgende twee positieve eigenschappen van Noordse leem:

- Hoger volumiek gewicht boven grondwater
Deze eigenschap wordt een groter voordeel als de grondwaterstand in maatgevende omstandigheden relatief laag ligt. Een tweede voorwaarde voor het behalen van voordeel is dat de toepassing van de Noordse leem in het weerstandbiedende deel van een bezwijkmechanisme moet liggen. In de praktijk houdt dat in dat vooral toepassing in de steunberm effectief is. Toepassing in de kern kan door de hogere verticale belasting leiden tot een nadeel in plaats van een voordeel.
- Lagere doorlatendheid
Deze eigenschap wordt een voordeel als de grondwaterstand zodanig wordt beïnvloed dat het grootste deel van de Noordse leem boven grondwater komt te liggen. In de profielen in de verkennende berekeningen komt dit voordeel niet tot uitdrukking. Met meer uitgebreide berekeningswijzen kunnen de verschillende aspecten van de lage doorlatendheid, zoals de te verwachten poriewaterdruk in het dijklichaam, beter nagegaan worden, wat mogelijk tot optimalisatie leidt.

Er is bij de berekeningen uitgegaan van de waarden voor sterkteparameters van Noordse Leem zoals die in [8] zijn bepaald. Met een meer uitgebreide verzameling van parameterwaarden van proeven is het aannemelijk dat de te gebruiken sterktewaarden hoger zijn dan hier nu aangenomen.

Het verdient aanbeveling om in een aantal ontwerpen voor te versterken of nieuw aan te leggen dijken de mogelijke winst verder te onderzoeken.

6 Conclusies

6.1 Bevindingen

Dit rapport beschrijft de eigenschappen van Noordse Leem om toepassing in de weg- en waterbouw te faciliteren. Noordse Leem betreft de fijne fractie van het breken en zeven van graniet en kwartsietgesteente dat met een flocculant uit het spoelwater is verzameld en dat vervolgens verder is ontwaterd. Jaarlijks wordt meer dan 200.000 m³ geproduceerd in de haven van Amsterdam. Het materiaal wordt veelal per schip aangevoerd. Noordse Leem combineert een relatief hoge sterkte met een zeer lage doorlatendheid, indien goed aangebracht.

De eigenschappen van Noordse Leem zijn gevoelig voor het watergehalte bij het aanbrengen en verdichten. Voor de meeste toepassingen is het nodig dat het watergehalte lager is dan ongeveer 26 % bij het verwerken en verdichten.

Noordse Leem is relatief zeer homogeen van samenstelling en eigenschappen bij gegeven watergehalte. Aangezien het materiaal Noordse Leem in verschillende opzichten afwijkt van natuurlijk in Nederland voorkomende grond, is de gebruikelijke classificatie van grond er beperkt relevant voor. Vanwege de homogeniteit van het materiaal en de constante oorsprong en wijze van verwerken volstaat het om de eigenschappen ervan te beoordelen aan de hand van het watergehalte.

Er zijn verschillende werken gerealiseerd met Noordse Leem in Nederland die goed functioneren. Het toepassen van Noordse Leem in weglichamen en terreinophogingen is goed mogelijk. De klink is zeer beperkt als het watergehalte bij aanbrengen voldoende laag is en wordt verder beperkt door verdichten van de grond. Er zijn geen beperkingen geconstateerd voor het toepassen van Noordse Leem in de kern van dijklichamen en de berm van waterkeringen. Voor het verwerken van Noordse Leem moet rekening gehouden worden met de invloed van het watergehalte op de eigenschappen ervan, hetgeen aandacht voor drainage van het werk en het oppervlak van aangebrachte leem vergt. Noordse Leem is zeer geschikt voor waterbodemafdichting ter beperking van kwel doordat het onder water enigszins wordt dichtgedrukt en fijne deeltjes grotere poriën vullen na verloop van tijd waardoor een homogene dichte laag ontstaat. Verdichten van een gestorte laag resulteert in een zeer slecht doorlatend pakket. Er is geconstateerd dat er geen doorpersen optreedt bij het aanbrengen van een bovenbelasting van zand, grind of stenen.

6.2 Aanbevelingen

Op basis van de inventarisatie in dit rapport wordt aanbevolen respectievelijk:

- Vaststellen van de constructieve eigenschappen in gerealiseerde werken, van zowel een werk dat minder dan 1 jaar geleden is aangelegd als wel van werken die enige jaren geleden zijn gerealiseerd. Het betreft daarbij zowel laboratoriumbepalingen als terreinonderzoek met bijvoorbeeld sonderingen en het beoordelen van de vormvastheid en overige functionaliteit in het terrein. De gegevens over de constructieve eigenschappen zijn van belang voor nadere specificatie van de toepassingsmogelijkheden.
- Het maken van proefvakken voor het bepalen van mogelijke optimalisatie van aanbrengen en verdichten.
- Het maken van een proefophoging van 5 m hoogte om de werkwijze te optimaliseren en om het functioneren van een grondlichaam vast te stellen.

7 Referenties

- [1] Deltares (2018). Specificaties voor het toepassen van Noordse Leem in Weg-en Waterbouwwerken in Nederland, inventarisatie: Voorlopig. Deltares rapport 11201985-002-GEO-0001, Versie 3, 3 april 2018, voorlopig, 36 pp.
- [2] Augustesen, A., M. Liingaard, P. V. Lade (2004). Evaluation of Time-Dependent Behavior of Soils. Intl. Journ. Of Geomechanics, 4/3, pp. 137-156.
- [3] Besluit Bodemkwaliteit (2007). <https://www.bodemplus.nl/onderwerpen/wet-regelgeving/bbk/> Informatie en achtergronden via Bodem+, geraadpleegd op 15 januari 2018.
- [4] CROW (2009). Zand in (constructieve) ophogingen en aanvullingen – richtlijn beoordeling van alternatieve materialen. Publicatie 281, Ede.
- [5] CROW (2014). Standaard RAW Bepalingen 2015.
- [6] Deltares 2017: Update inzichten in gebruik van klei voor ontwerp en uitvoering van dijkversterking. Deltares rapport 1220633-000-GEO-0012 voor RWS, Delft, 38 pp.
- [7] Entry, J.A., R.E. Sojka, B.J. Hicks (2008). Carbon and nitrogen stable isotope ratios can estimate anionic polyacrylamide degradation in soil Geoderma 145, pp. 8-16.
- [8] Fugro (2012a). Toepassingsmogelijkheid Noordse klei in boezemkades. Rapport 1211-0095-000.R01, 6 april 2012.
- [9] Fugro (2012b). Steekproef d.d. 25 oktober 2012, moederpartij Amerikahavenweg 2 te Amsterdam. Memo voor Graniet Import Benelux BV dd. 2012-10-26, 1 pp.
- [10] Fugro (2012c). Advisering toepassing klei ten behoeve van dijk en kade verbeteringen. Rapport 1211-0095-000.R01/BMB/ASW voor Graniet Import BV, Amsterdam, 32 pp.
- [11] Fugro (2017). Rapportage laboratoriumonderzoek. Rapport d.d. 2017-03-28 voor Liebrechts BV, Middelbeers, 3 pp.
- [12] GMRS (2015). Report on the petrographic analysis of a sample of coarse aggregate from Glensanda Quarry (Sample, M75537). Report 54381/K for Sandberg, Glasgow, 10 pp.
- [13] G-technics (2011a). Granietgrond. Rapport voor Graniet Import Benelux BV Amsterdam, 8 pp.
- [14] GTechnics (2011b). Civieltechnische eigenschappen granietgrond. Rapport 1 maart 2011.
- [15] Guezenneq A.G., C.Michel, S. Ozturk, A. Togola, J. Guzzo , N. Desroche (2015a). Microbial aerobic and anaerobic degradation of acrylamide in -- case study in a sand and gravel quarry. Environ Sci. Pollut Res. 22, pp.6440–6451.
- [16] Guezenneq A.G., C.Michel, K. Bru, C. Touzé, N. Desroche, I. Mnif, M. Motelica-Heino (2015b). Transfer and degradation of polyacrylamide-based flocculants in hydrosystems: a review. Environ Sci. Pollut Res. 22, pp.6390–6406.
- [17] Haase, H., T. Schanz (2016). Compressibility and saturated hydraulic permeability of clay-polymer composites — experimental and theoretical analysis. Applied Clay Science, 130, pp. 62-75.
- [18] H&H (2013a). Petrographic analysis of a rock sample, Bremanger Quarry, Norway, Sample A. Report HH/13/4864/T1 monster SN2855, for BAM Ritchies, Glasgow, 11 pp.
- [19] H&H (2013b). Petrographic analysis of a rock sample, Bremanger Quarry, Norway, Sample B. Report HH/13/4864/T1 monster SN2856, for BAM Ritchies, Glasgow, 11 pp.
- [20] Kolay, P. K., B. Dhakal, K. Vijay, S. K. Puri (2016). Effect of Liquid Acrylic Polymer on Geotechnical Properties of Fine-Grained Soils. Int. J. of Geosynth. and Ground Eng., pp. 2-29.
- [21] Li, Shu-qin, L. Wang, J. Xu (2011). Isolation and Identification of A Polyacrylamide degrading Fungus and Its Degradation Characteristics. 2011 ICECE, Yichang (in het Chinees met Engelse abstract en bijschriften)

- [22] Mao, X., and Fahey, M. (1999). A method of reconstituting an aragonite soil using a synthetic flocculant. *Géotechnique*, 49/1, pp. 15-32.
- [23] Melspring (2017). Veiligheidsinformatieblad overeenkomstig Verordening (EG) Nr. 1907/2006
- [24] Michalowski, R. L. , Z. Wang, S. S. Nadukuru (2018). Maturing of contacts and ageing of silica sand. *Géotechnique* 68, 2, pp. 133/145.
- [25] Monkul, M. M., E. Etminan, A. Senol (2017). Coupled influence of content, gradation and shape characteristics of silts on static liquefaction of loose silty sands. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 101, pp. 12–26.
- [26] NEN 5104 (1989). Geotechniek: Classificatie van onverharde grondmonsters. NNI, Delft, 23 pp.
- [27] Park, K-H., Y-H. Jung, C-K Chung (2017). Evolution of stiffness anisotropy during creep of engineered silty sand in South Korea. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21/6, pp. 2168–2176.
- [28] (REACH) EcoPure P-1715, Versienummer: 2.0, Vervangt de versie van: 04.05.2016 (1), Herziening: 17.11.2017, Eerste versie: 29.04.2016
- [29] Reid, D., A. Fourie (2015). Laboratory assessment of the effects of polymer treatment on geotechnical properties of low plasticity soil slurry. *Canadian Geotechnical Journal*, 53/10, pp. 1718-1730.
- [30] Rijkswaterstaat (2016). Eisen onderbouw. Definitieve versie versie 6, 1 november 2018.
- [31] Rijkswaterstaat (2017). Basisspecificatie Dijk. Definitieve versie 1 december 2017.
- [32] Song, W., Y Zhang, Y. Gao, D. Chen, M. Yang (2017). Cleavage of the main carbon chain backbone of high molecular weight polyacrylamide by aerobic and anaerobic biological treatment. *Chemosphere* 189, pp.277-283.
- [33] Suarez, N. R. (2012). Micromechanical Aspects of Aging in Granular Soils. Virginia Polytechnic Institute and State University, 366 pp.
- [34] TAW (1996). Technisch rapport klei voor dijken. Nummer TR17.
- [35] Touzé, S., V. Guerin, A-G. Gwenaëlle Guenzennec, S. Binet, A. Togola (2015). Dissemination of polyacrylamide monomer from polyacrylamide-based flocculant use – sand and gravel quarry case study. *Environ Sci. Pollut Res.* 22, pp.6423–6430.
- [36] Towhata, I., Y. Taguchi, T. Hayashida, S. Goto, Y. Sintaku, Y. Hamada, S. Aoyam (2017). Liquefaction perspective of soil ageing. *Géotechnique*, 67-6, pp. 467/478.
- [37] Wiertsema (2015). Geotechnisch laboratoriumonderzoek Graniet klei W.R.P. te Leek. Rapport VN-62165-1 voor Van der Wiel Transport BV, Drachten, 7 pp.
- [38] Yu, F., R. Fu, Y. Xie, W. Chen (2015). Isolation and Characterization of Polyacrylamide-degrading Bacteria from Dewatered Sludge. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 12, pp. 4214-4230.
- [39] Zhao, L., C. Zhang, M. Bao, J. Lu (2018). Effects of different electron acceptors on the methanogenesis of hydrolyzed polyacrylamide biodegradation in anaerobic activated sludge systems. *Bioresource Technology*, 247, pp. 759-768.
- [40] Deltares (2019). Samendrukkings eigenschappen Noordse leem. Briefrapport 11201985-002-GEO-0002.

A Toepassingen Noordse Leem

Overzicht van de locaties van uitgevoerde werken.

Specificaties van de werken staan in de tabel op de volgende pagina.



	Locatie van het werk	Jaar van uitvoeren	Opdrachtgever	Toepassing	geleverde hoeveelheid [ton]	Tijd van het jaar	Weersomstandigheden
Westzaan Hoogtij	Westzanerpolder	2017		Ophoging / bouwrijp maken terrein	> 225.000	1e kwartaal	droog
GBT Over de Maas	Dreumel	2016		Verondieping zandwinput	125.000	-	-
De Deelen Deel 2 Akkrum	Akkrum	2016	Wetterskip Fryslan (Van der Wiel uitvoerder)	Boezemkade	120.000	Zomer	Droog
Kraaijenbergse plassen	Cuijk	2012-2016		Verondieping zandwinput	260.000	-	-
TAG West	Genemuiden	2012	De Waard BV	Ophoging / bouwrijp maken woonwijk	100.000	oktober	Nat
Luwtezone Windpark Westermeerwind	IJsselmeer	2012	Boskalis	Onderwaterberm in de luwte van een geleidedam	150.000	zomer	Nat en droog
Uitdam Marina resort	Uitdam	2012	Martens & Van Oord	Ophoging / bouwrijp maken	60.000	Zomer	Droog
De Oevers bouw - woonrijp maken	Roelofsarendsveen	2013	Boskalis	Ophoging / bouwrijp maken	50.000	Zomer	Nat en droog
Haarlemmervaart Westergasfabriek	Amsterdam	2013	Waternet	Waterdichte afsluiting kanaalbodem	30.000	1 ^{ste} kwartaal	Nat en droog
Hooivaart De Delen Deel 1	Tijnje, Friesland	2012	Wetterskip Fryslan	Boezemkade	15.000	herfst	Nat en droog
Legmeerdijk	De Kwakel, Uithoorn	2011	Waternet	Steunberm en onderbaan voor de Legmeerdijk	5.000	-	droog
Proefdijk IJlst	IJlst, Friesland	2011	Wetterskip Fryslan	Dijk	3.000	-	-
Danzigerkade	Amsterdam	2012	Port of Amsterdam	Tijdelijke oeverbescherming / afsluiting langs vaargeul + ophoging onder weg	3.000	-	droog
Beekbekleding Veluwe	Diversen			Beekbekleding	-	-	-

Tabel A.1 Overzicht van gerealiseerde toepassingen van Noordse Leem sedert 2011

B Geschiktheid van Noordse leem

B.1 Wegenbouw – rijkswegen

De Eisen Onderbouw zijn gegeven in Tabel B.1. De tabel geeft ook aan of de Noordse leem voldoet aan de eisen, of onder welke voorwaarden de Noordse leem aan de eisen kan voldoen.

Eis nr.	Eis	Noordse leem
Constructieve ophoging, Constructieve aanvulling onder water		
OB.02	Restzettingsverschil onderbouw in langsrichting	Aan de eis kan in de uitvoering worden voldaan . De kruip van de ondergrond is maatgevend als de Noordse leem van gelijkmatige samenstelling is en gelijkmatig en voldoende is verdicht.
OB.03	Restzetting onderbouw onder stootplaat of stootvloer	Per geval dient te worden beoordeeld of aan de eis zal worden verdaan, door beschouwing van de kruip van Noordse Leem én de ondergrond. Alternatief: indien niet aan de eis wordt voldaan de dikte van de Noordse leem in langsrichting geleidelijk afbouwen richting stootplaat of stootvloer. Ter plaats van stootplaat of stootvloer de ophoging uitvoeren in materiaal dat niet kruit.
OB.04	Restzettingsverschil onderbouw in dwarsrichting	Aan de eis kan in de uitvoering worden voldaan . De kruip van de ondergrond is maatgevend als de Noordse leem van gelijkmatige samenstelling is en gelijkmatig en voldoende is verdicht.
OB.05	Stabiliteit onderbouw in de realisatiefase	Per geval door berekening aan te tonen. Maatgevend is de situatie tijdens ophogen, waarbij wateroverspanningen kunnen ontstaan in de Noordse leem. Dit levert mogelijk beperkingen op aan het ophoogtempo.
OB.06	Stabiliteit onderbouw vanaf ingebruikname	Aan de eis kan worden voldaan . De sterkte van Noordse leem is nauwelijks lager dan die van zand. Daarom zal toepassing van Noordse leem in plaats van zand geen grote gevolgen hebben voor het ontwerp.

Eis nr.	Eis	Noordse leem
OB.07	Drooglegging onderbouw	De drooglegging moet worden gerealiseerd door een voldoende dikke belastingspreidende laag op de Noordse leem. Aan deze en de volgende eis wordt voldaan door minimaal 1 m zand voor zandbed aan te brengen op de Noordse leem.
Bijlage 2.5	Eisen aan overige onderbouw-materialen	Noordse leem dient te voldoen aan een materiaalspecifieke toepassingsverklaring, die kan worden aangevraagd via het RWS Steunpunt Wegenbouw en Geotechniek.

Tabel B.1 Eisen voor toepassingen in rijkswegen volgens de 'Eisen Onderbouw' van Rijkswaterstaat

B.2 Wegenbouw – provinciale wegen

CROW 281 suggereert voor provinciale wegen dezelfde prestatie-eisen aan te houden als voor rijkswegen. CROW 281 geeft in Tabel 1.4a voor provinciale wegen een uitwerking van prestatie-eisen naar eisen aan het materiaal. De eisen zijn gegeven in Tabel B.2. De tabel geeft ook aan of de Noordse Leem ('granuliet') voldoet aan de eisen, of onder welke voorwaarden de Noordse Leem aan de eisen kan voldoen.

Eis nr.	Eis	Noordse leem
Constructieve ophoging, constructieve ophoging voor wegverbreding		
Par. 3.1.1	Consistentie-index	Het watergehalte bij verwerking dient overeen te komen met een consistentie-index tussen 0,6 en 1,0. De waarde 0,6 geldt voor klei en is niet van toepassing voor Noordse Leem. Voor Noordse Leem moet het watergehalte lager dan 26 % zijn en de droge volumieke massa hoger dan 1,56 t/m ³ . Aan de eis kan worden voldaan door voldoende rijping in een depot.
	Laagdikte na verdichten	Aan de eis kan in de uitvoering worden voldaan . Na het verdichten dient de laagdikte 0,25 m tot 0,30 m te zijn. Voor Noordse Leem zorgt intensiever verdichten (lagen van 0,2 m dikte) tot hogere stijfheid en lagere compactie vanwege de plasticiteit van de grond na aanbrengen verdichting.
	Afwatering	Aan de eis kan in de uitvoering worden voldaan . De bovenste lagen onder licht afschot (1:10 – 1:20) verwerken.

Eis nr.	Eis	Noordse leem
	Weersinvloeden	Aan de eis kan in de uitvoering worden voldaan . Noordse leem niet verwerken bij neerslag of vorst.
We.Cf.1.1	Restvolumeverandering gedurende levensduur (klink)	De eis is dat de klink maximaal 2% in 30 jaar bedraagt. Per geval dient te worden beoordeeld of aan de eis zal worden verdaan, door beschouwing van de kruip van Noordse Leem. Een indicatieve berekening (Koppejan) geeft aan dat aan de eis wordt voldaan voor voldoende verdichte Noordse Leem.
We.Cf.1.2.1	Verval organisch materiaal	Aan de eis wordt voldaan omdat het gloeiverlies van Noordse leem kleiner is dan 10%.
We.Cf.1.2.2	Collapse/zwel/krimp	Het watergehalte bij verwerking dient overeen te komen met een consistentie-index tussen 0,7 en 1,0. De waarde 0,7 geldt voor klei en is niet van toepassing voor Noordse Leem. Voor Noordse Leem moet het watergehalte lager dan 26 % zijn en de droge volumieke massa hoger dan 1,56 t/m ³ . Aan de eis kan worden voldaan door voldoende rijping in een depot.
We.Ve.1.1	Restvolumeverandering stootplaat t.p.v.	Per geval dient te worden beoordeeld of aan de eis zal worden verdaan, door beschouwing van de kruip van ophoging én ondergrond. Alternatief: indien niet aan de eis wordt voldaan de dikte van de Noordse leem in langsrichting geleidelijk afbouwen richting stootplaat of stootvloer. Ter plaats van stootplaat of stootvloer de ophoging uitvoeren in materiaal dat niet kruipt.
We.Ve.3.1	Minimale en maximale dwarshelling	Aan de eis kan in de uitvoering worden voldaan . De kruip van de ondergrond is maatgevend als de Noordse leem van gelijkmatige samenstelling is en gelijkmatig is verdicht.

Eis nr.	Eis	Noordse leem
We.Ve.4.1.1	Dynamische elasticiteitsmodulus	Het is niet duidelijk of aan de eis wordt voldaan omdat alleen indirecte metingen beschikbaar zijn op erg nat materiaal. De geschatte dynamische elasticiteitsmodulus van Noordse leem [13] ligt onder de eis, of voldoet net aan de eis. Alternatief: Indien niet aan de eis wordt voldaan het verhardingsontwerp zodanig aanpassen dat aan de prestatie-eisen aan het dragen van de verkeersbelasting wordt voldaan.
We.Be.1.1	Veiligheidsfactor definitieve situatie	Aan de eis kan worden voldaan . De sterkte van Noordse leem is nauwelijks lager dan die van zand. Daarom zal toepassing van Noordse leem in plaats van zand geen grote gevolgen hebben voor het ontwerp.
We.Be.2.1	Drooglegging	De drooglegging moet worden gerealiseerd door een voldoende dikke belastingspreidende laag op de Noordse leem. Aan deze wordt voldaan door minimaal 1 m zand voor zandbed aan te brengen op de Noordse leem.
Constructieve aanvulling onder water, constructieve aanvulling onder water voor wegverbreding		
-	Geen eisen gegeven.	Per geval aan te tonen.

Tabel B.2 Eisen voor toepassingen in provinciale wegen volgens CROW 281

B.3 Wegenbouw – gemeentelijke wegen

CROW 281 geeft in Tabel 1.4b voor gemeentelijke wegen een uitwerking van prestatie-eisen naar eisen aan het materiaal. De eisen zijn gegeven in Tabel B.3. De tabel geeft ook aan of de Noordse leem voldoet aan de eisen, of onder welke voorwaarden de Noordse leem aan de eisen kan voldoen.

Eis nr.	Eis	Noordse leem
Constructieve ophoging, constructieve ophoging voor wegverbreding		
Par. 3.1.1	Consistentie-index	Het watergehalte bij verwerking dient overeen te komen met een consistentie-index tussen 0,6 en 1,0. De waarde 0,6 geldt voor klei en is niet van toepassing voor Noordse Leem. Voor Noordse Leem moet het watergehalte lager dan 26 % zijn en de droge volumieke massa hoger dan 1,56 t/m ³ . Aan de eis kan worden voldaan door voldoende rijping in een depot.

Eis nr.	Eis	Noordse leem
	Laagdikte na verdichten	Aan de eis kan in de uitvoering worden voldaan . Na het verdichten dient de laagdikte 0,25 m tot 0,30 m te zijn.
	Afwatering	Aan de eis kan in de uitvoering worden voldaan . De bovenste lagen onder licht afschot verwerken.
	Weersinvloeden	Aan de eis kan in de uitvoering worden voldaan . Noordse leem niet verwerken bij regen of vorst.
Bo.Ve.2.1	Restvolumeverandering gedurende levensduur (klink)	De eis is dat de klink maximaal 2% in 30 jaar bedraagt. Per geval dient te worden beoordeeld of aan de eis zal worden verdaan, door beschouwing van de kruip van Noordse Leem. Een indicatieve berekening (Koppejan) geeft aan dat aan de eis wordt voldaan voor voldoende verdichte Noordse Leem.
Bo.Ve.2.2.1	Verval organisch materiaal	Aan de eis wordt voldaan omdat het gloeiverlies van Noordse leem kleiner is dan 10%.
Bo.Ve.2.2.2	Collapse/zwel/krimp	Het watergehalte bij verwerking dient overeen te komen met een consistentie-index tussen 0,7 en 1,0. De waarde 0,7 geldt voor klei en is niet van toepassing voor Noordse Leem. Voor Noordse Leem moet het watergehalte lager dan 26 % zijn en de droge volumieke massa hoger dan 1,56 t/m ³ . Aan de eis kan worden voldaan door voldoende rijping in een depot.
Bo.Ve.1.1	Restvolumeverandering stootplaat t.p.v.	Per geval dient te worden beoordeeld of aan de eis zal worden verdaan, door beschouwing van de kruip van ophoging én ondergrond. Alternatief: indien niet aan de eis wordt voldaan de dikte van de Noordse leem in langsrichting geleidelijk afbouwen richting stootplaat of stootvloer. Ter plaats van stootplaat of stootvloer de ophoging uitvoeren in materiaal dat niet kruit.

Eis nr.	Eis	Noordse leem
Bo.Ve.3.1	Minimale en maximale dwarsshelling	Aan de eis kan in de uitvoering worden voldaan . De kruip van de ondergrond is maatgevend als de Noordse leem van gelijkmatige samenstelling is en gelijkmatig is verdicht.
Bo.Ve.4.1.1	Dynamische elasticiteitsmodulus	Het is niet duidelijk of aan de eis wordt voldaan omdat alleen indirecte metingen beschikbaar zijn op erg nat materiaal. De geschatte dynamische elasticiteitsmodulus van Noordse leem [5] ligt onder de eis, of voldoet net aan de eis. Alternatief: indien niet aan de eis wordt voldaan het verhardingsontwerp zodanig aanpassen dat aan de prestatie-eisen aan het dragen van de verkeersbelasting wordt voldaan.
Bo.Be.1.1	Veiligheidsfactor definitieve situatie	Aan de eis kan worden voldaan . De sterkte van Noordse leem is nauwelijks lager dan die van zand. Daarom zal toepassing van Noordse leem in plaats van zand geen grote gevolgen hebben voor het ontwerp.
Constructieve aanvulling onder water, Constructieve aanvulling onder water voor wegverbreding		
-	Geen eisen gegeven.	Per geval aan te tonen.

Tabel B.3 Eisen voor toepassingen in gemeentelijke wegen volgens CROW 281

B.4 Waterkeringen – kern en berm

De eisen volgens de Basisspecificatie Dijk [30] zijn gegeven Tabel B.4. De tabel geeft ook aan of de Noordse leem voldoet aan de eisen, of onder welke voorwaarden de Noordse leem aan de eisen kan voldoen. Er is uitgegaan van dat het materiaal onder in de categorie klei hoort, hetgeen niet altijd van toepassing is zoals in de tabel is aangegeven.

Eis nr.	Eis	Noordse leem
Kern, berm		
DK-034	Vermenging van klei met andere materialen, bouwstoffen of ander bodemvreemd materiaal	Aan de eis kan in de uitvoering worden voldaan . Eis over te nemen in Werkplan Uitvoering.

Eis nr.	Eis	Noordse leem
DK-035	Verdichting conform de eisen uit deelhoofdstuk 22.0 van de Standaard RAW bepalingen 2015 [5]. In aanvulling hierop dient bij de verdichtingscontrole de oppervlakte van de kleilaag te zijn verdeeld in vakken van maximaal 2000 m ² .	Aan de eisen kan in de uitvoering worden voldaan. Noordse leem en ondergrond moeten vorst- en sneeuwvrij zijn. Noordse leem niet aanbrengen op een ondergrond waarop waterplassen staan. Lagen van Noordse leem afwaterend aanbrengen. Vervoer van bouwstoffen over de reeds aangebrachte Noordse leem moet versporend gebeuren. De eis DK-035 vermeldt dat de Noordse leem moet worden verdicht tot minimaal 97% van de éénpuntsproctordichtheid (EPD) bij het veldvochtgehalte.
	Consistentie-index	Het watergehalte bij verwerking dient overeen te komen met een consistentie-index groter dan of gelijk aan 0,6 en kleiner dan of gelijk aan het optimum vochtgehalte in de proctorproef. De eis betreft de werking van klei (effecten van zwellen krimpen, verwerkbaarheid en verdichtbaarheid). Zwel en krimp zijn niet significant in toepassingen van Noordse Leem. De waarde 0,6 geldt voor klei en is niet van toepassing voor Noordse Leem. Voor Noordse Leem moet het watergehalte lager dan 26 % zijn en de droge volumieke massa hoger dan 1,56 t/m³. Aan de eis kan worden voldaan door voldoende rijping in een depot.
	Aanbrengen klei	Aan de eis kan in de uitvoering worden voldaan. De Noordse leem in lagen aanbrengen en verdichten.
	Laagdikte na verdichten	Aan de eis kan in de uitvoering worden voldaan. Na het verdichten dient de laagdikte 0,25 m tot 0,30 m te zijn.

Eis nr.	Eis	Noordse leem
DK-037	Klei dient te voldoen aan de eisen genoemd in het TAW Technisch Rapport Klei voor dijken [34]	Noordse leem voldoet aan de eisen voor categorie 3 klei. Het organisch stofgehalte is lager dan 1% [8] en voldoet aan de eis. Het zoutgehalte is lager dan 0,5% [8] en voldoet aan de eis. Het watergehalte bij verwerking dient overeen te komen met een consistentie-index groter dan of gelijk aan 0,6. De eis betreft de werking van klei (effecten van zwellen krimpen, verwerkbaarheid en verdichtbaarheid). Zwel en krimp zijn niet significant in toepassingen van Noordse Leem. De waarde 0,6 geldt voor klei en is niet van toepassing voor Noordse Leem. Voor Noordse Leem moet het watergehalte lager dan 26 % zijn en de droge volumieke massa hoger dan 1,56 t/m³. Aan de eis kan worden voldaan door voldoende rijping in een depot. Het kalkgehalte is lager dan 10 % [8] en voldoet aan de eis. Noordse leem voldoet aan de eis dat er geen extreme verkleuringen optreden bij ontgraven of drogen. Noordse leem voldoet aan de eis dat er geen afwijkende sterke geur optreedt. Aan de eis kan in de uitvoering worden voldaan. Brokken Noordse leem in elkaar werken op een zodanige wijze dat de grote poriën en holten tussen de brokken worden dichtgedrukt. Eisen aan en aanbevelingen voor aanbrengen en verdichten zijn gegeven in paragraaf 4.5.

Tabel B.4 Eisen voor toepassingen in waterkeringen volgens de 'Basisspecificaties Dijk' van Rijkswaterstaat

B.5 Gebiedsophoging

CROW 281 geeft in Tabel 1.4b een constructie-eis voor bouwrijp maken. Er is geen uitwerking naar eisen aan het materiaal gegeven. De eisen zijn gegeven in Tabel B.5. De tabel geeft ook aan of de Noordse leem voldoet aan de eisen, of onder welke voorwaarden de Noordse leem aan de eisen kan voldoen.

Eis nr.	Eis	Noordse leem
Niet-constructieve ophoging, niet-constructieve aanvulling		
Par. 3.1.1	Consistentie-index	Het watergehalte bij verwerking dient overeen te komen met een consistentie-index tussen 0,6 en 1,0. De eis betreft de werking van klei (effecten van zwellen krimpen, verwerkbaarheid en verdichtbaarheid). Zwellen en krimp zijn niet significant in toepassingen van Noordse Leem. De waarde 0,6 geldt voor klei en is niet van toepassing voor Noordse Leem. Voor Noordse Leem moet het watergehalte lager dan 26 % zijn en de droge volumieke massa hoger dan 1,56 t/m³. Aan de eis kan worden voldaan door voldoende rijping in een depot.
	Laagdikte na verdichten	Aan de eis kan in de uitvoering worden voldaan. Na het verdichten dient de laagdikte 0,25 m tot 0,30 m te zijn. Voor Noordse Leem leidt intensiever verdichten in lagen van 0,2 m dikte tot hogere stijfheid en lagere compactie vanwege de plasticiteit van de grond na aanbrengen verdichting.
	Afwatering	Aan de eis kan in de uitvoering worden voldaan. De bovenste lagen onder licht afschot (1:10 – 1:20) verwerken.
	Weersinvloeden	Aan de eis kan in de uitvoering worden voldaan. Noordse leem niet verwerken bij neerslag of vorst.
Bo.Mn.1.1	Volumeverandering ophoogmateriaal en zetting	Per geval door berekening aan te tonen.

Tabel B.5 Eisen voor toepassingen in bouwrijp maken volgens CROW 281

C Stabiliteitsberekeningen

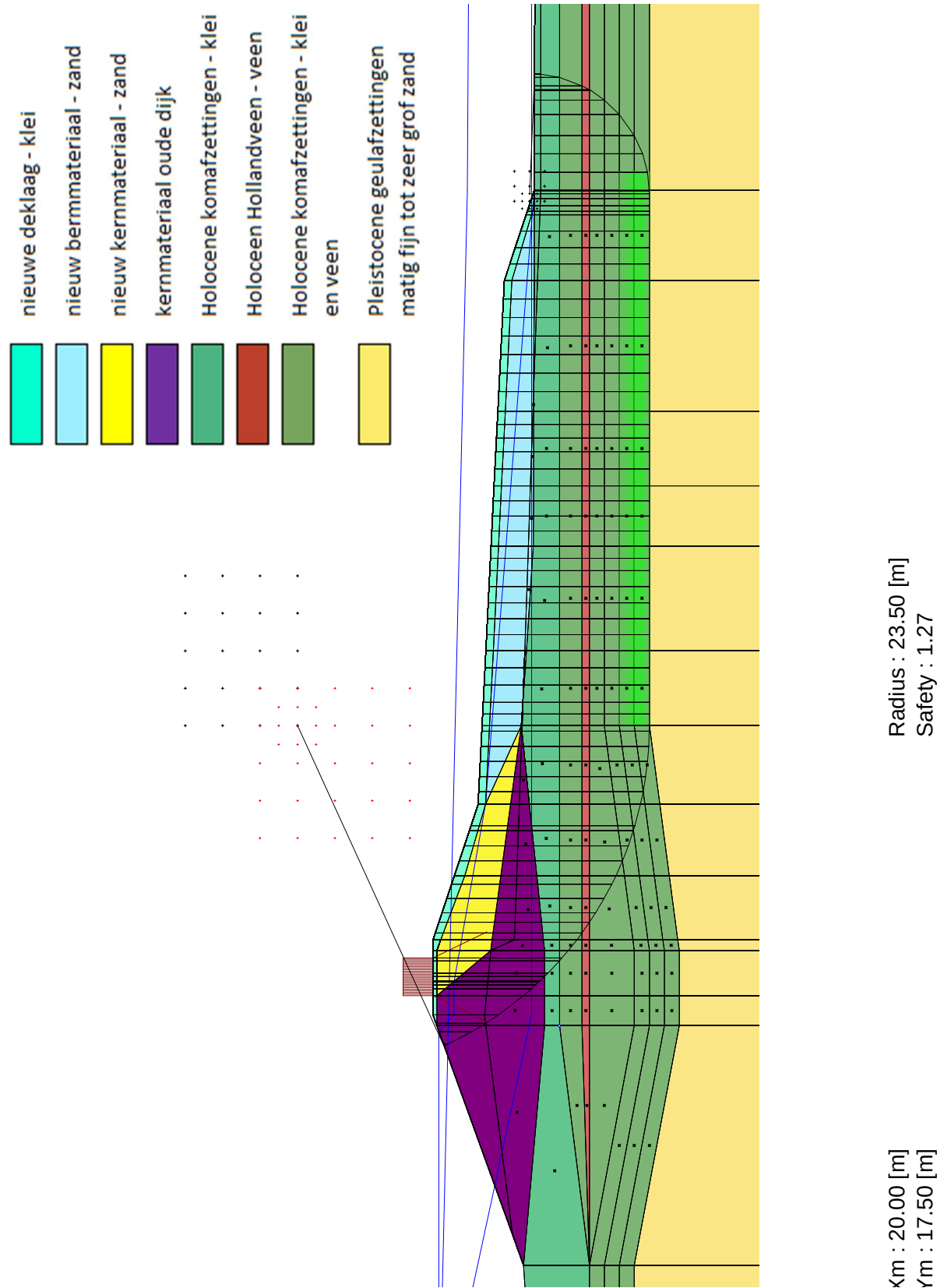
C.1 Algemeen

Er zijn stabiliteitsberekeningen gemaakt met de gebruikelijke berekeningswijze voor het ontwerpen van dijken waar geen bijzondere randvoorwaarden voor gelden. De berekeningen zijn gebaseerd op dijkprofielen in het rivierengebied (geanonimiseerd) met de daarbij aanwezige ondergrond. In de volgende paragrafen zijn de dijkprofielen grafisch weergegeven. De berekende stabiliteitsfactoren zijn samengevat in Tabel C.1.

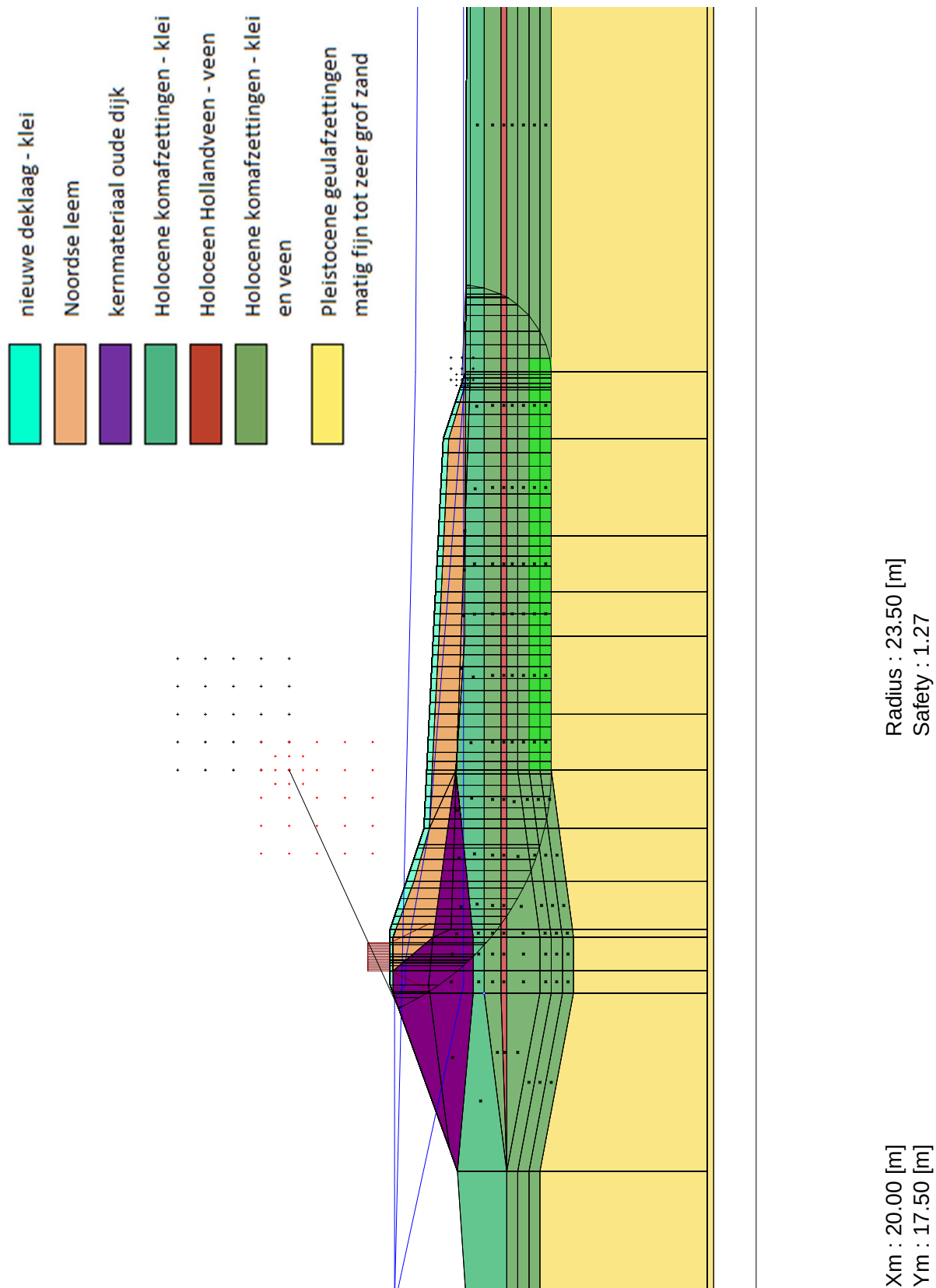
Profiel	Stabiliteitsfactor	Paragraaf
Profiel I (voornamelijk klei ondergrond)		
Zand in kern en berm	1,267	C2
Noordse leem in kern en steunberm	1,266	C3
Noordse leem alleen in de steunberm	1,274	C4
Profiel II (ondergrond met dikke veenlaag)		
Zand in kern en berm	1,206	C5
Noordse leem in kern en steunberm	1,181	C6
Noordse leem alleen in de steunberm	1,205	C7

Tabel C.1 Overzicht van de berekende stabiliteitsfactoren voor de gebruikelijke dijkverbetering met zand en verbetering met Noordse Leem.

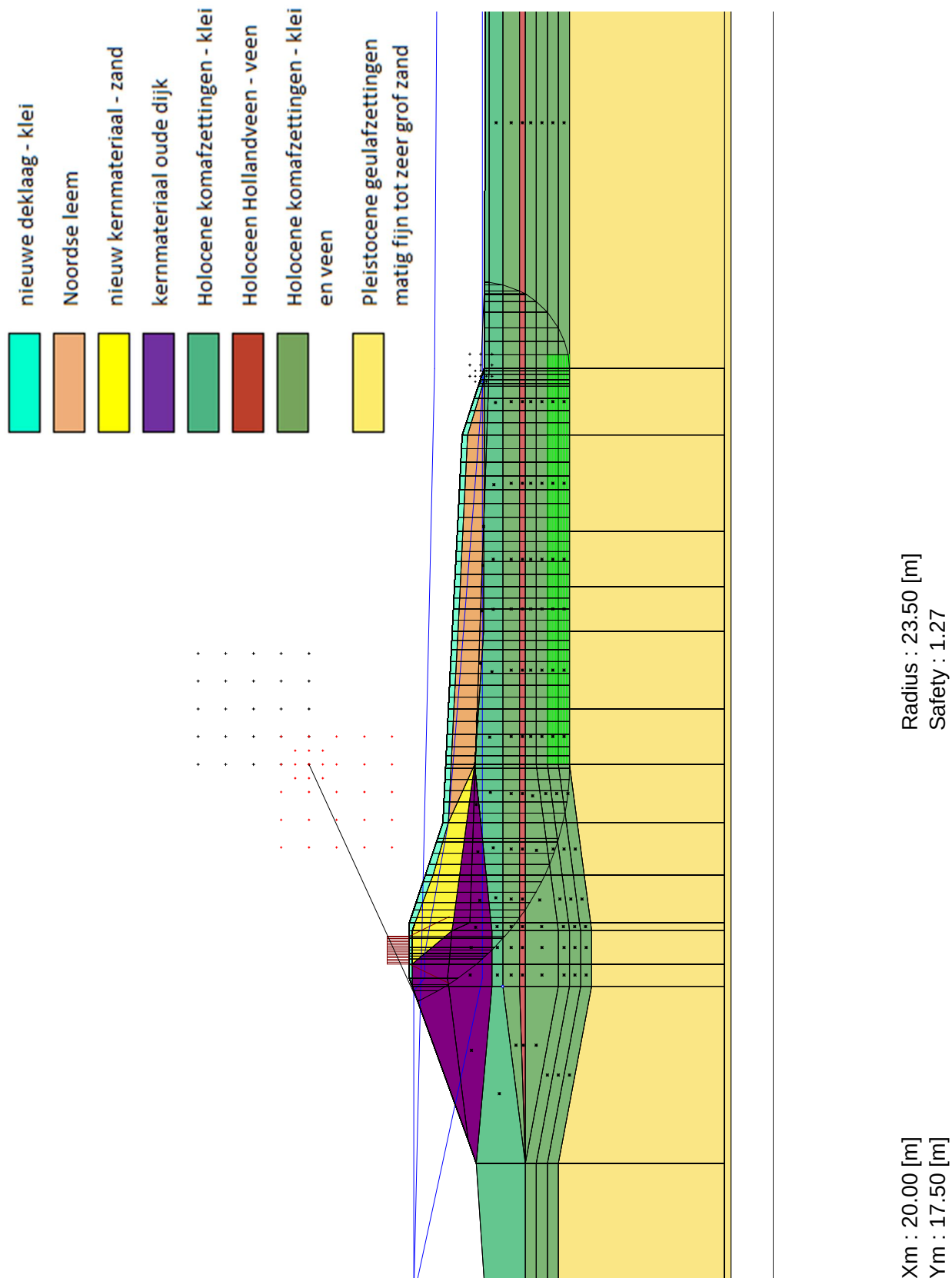
C.2 Profiel I – toepassing van zand



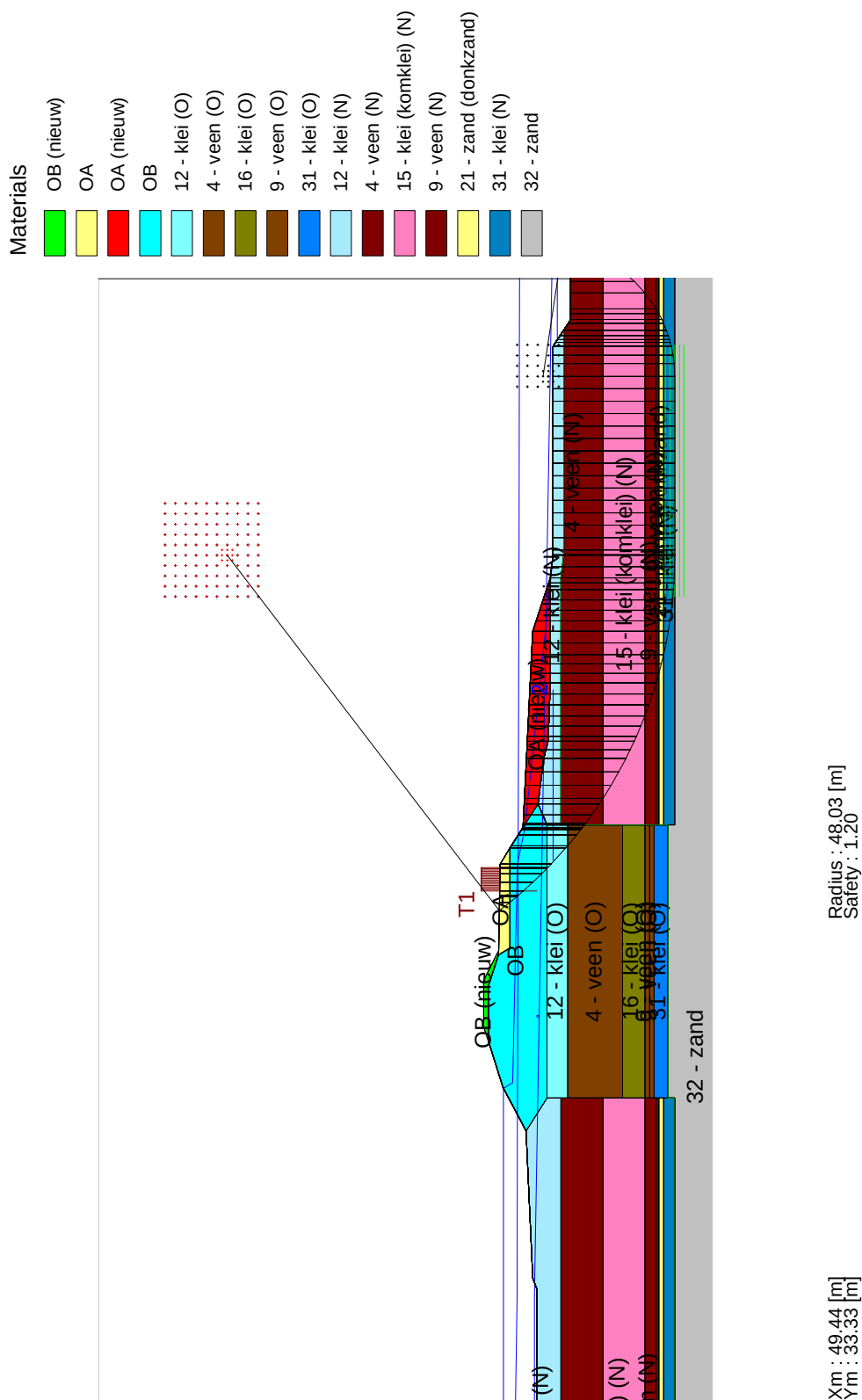
C.3 Profiel I – toepassing van Noordse leem in kern en steunberm



C.4 Profiel I – toepassing van Noordse leem alleen in de steunberm



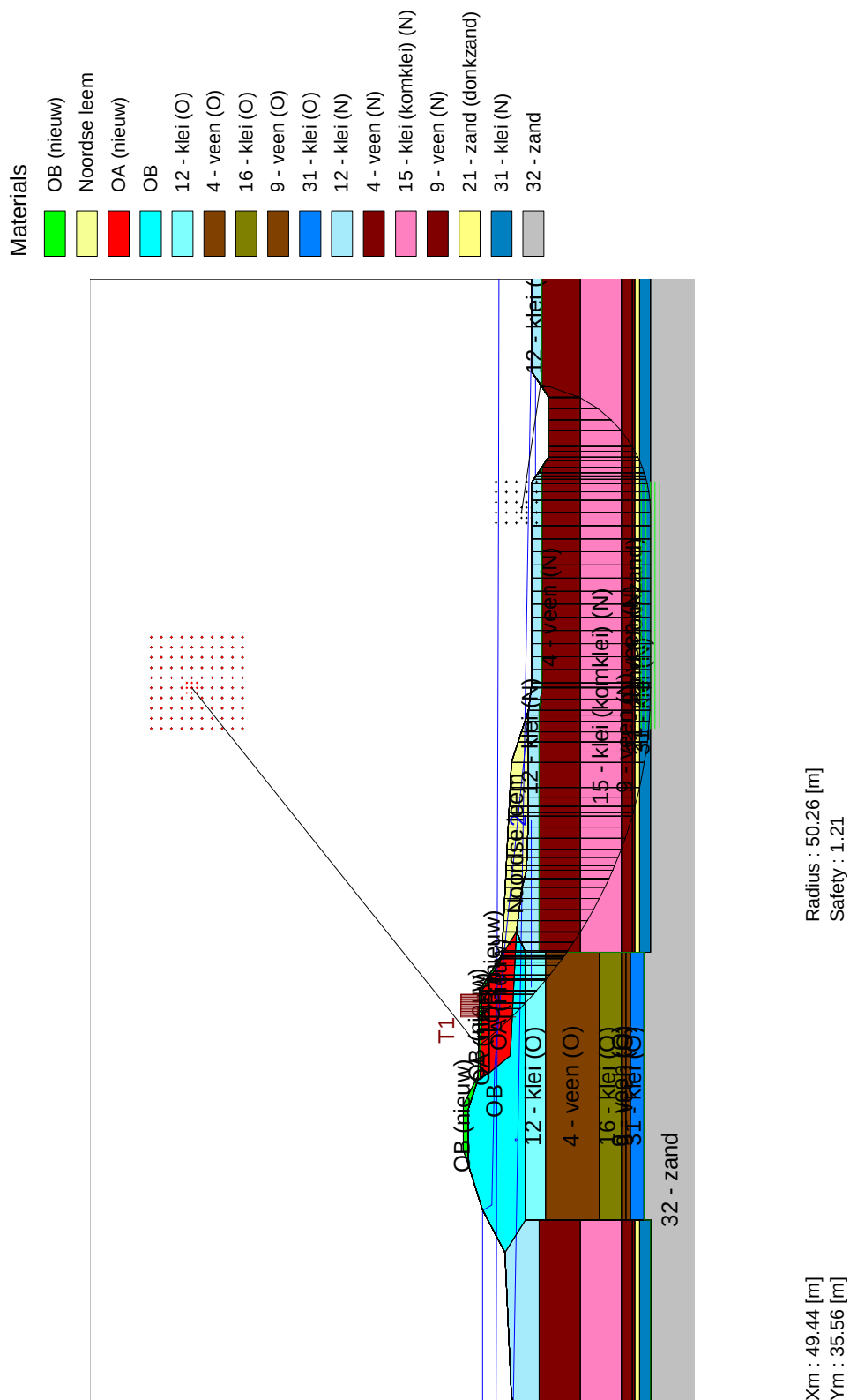
C.5 Profiel II – toepassing van zand



Radius : 51.92 [m]
Safety : 1.18

m : 50.56 [m]
m : 37.22 [m]

C.7 Profiel II – toepassing van Noordse leem alleen in de steunberm



D Samendrukkingseigenschappen van Noordse leem en voorbeeldberekening

D.1 Resultaten samendrukkingsproeven

In opdracht van Graniet Import Benelux (GIB) heeft Deltares drie samendrukkingsproeven uitgevoerd op Noordse leem. De Noordse leem is in december 2018 bemonsterd in het depot aan de Amerikahavenweg in Amsterdam. Deze bijlage geeft een overzicht van de resultaten van de samendrukkingsproeven en de parameters die in geotechnische berekeningen gebruikt kunnen worden.

Bijlagen 1 tot en met 3 van [40] geven de resultaten van één K_0 -CRS proef en twee standaardproeven conform NEN 5118:1991 nl. Het belastingtraject in de proeven is van 20 tot 320 kPa, met ontlast – herbelast stap. De laatste belastingtrap in de standaardproeven heeft 3 dagen geduurd om de kruipparameters beter te kunnen bepalen.

Tabel D.1 en Tabel D.2 geven de classificatieparameters en de geotechnische parameters die in de proeven zijn bepaald. De parameters zijn gemiddelde waarden. Voor bepaling van representatieve waarden zijn nog te weinig proeven uitgevoerd. Naar verwachting is de variatiecoëfficiënt van het volumiek gewicht lager dan 0,05, en de variatiecoëfficiënt van de samendrukkingsparameters lager dan 0,25.

Parameter	Waarde
Grondbeschrijving (NEN 5104)	LEEM, zwak zandig
Volumiek gewicht in natuurlijke toestand γ_{nat} [kN/m ³]	19,7
Volumiek gewicht in droge toestand γ_d [kN/m ³]	16,5
Watergehalte in natuurlijke toestand w_{nat} [%]	19,0
Porositeit n_o , met soortelijke massa vaste delen = 2,70 [-]	0,38
Poriëngetal e_o , met soortelijke massa vaste delen = 2,70 [-]	0,60

Tabel D.1 Classificatieparameters van de Noordse leem.

Parameter	Waarde
NEN Bjerrum parameters	
Reloading / swelling Ratio $RR = C_{sw}/(1+e_0)$ C_{sw} samendrukkingsindex bij ontlasten / herbelasten [-] e_0 poriëngetal [-]	$3,7 \cdot 10^{-3}$
Compression Ratio $CR = C_c/(1+e_0)$ C_c primaire samendrukkingsindex bij belasten [-] e_0 poriëngetal [-]	$5,2 \cdot 10^{-2}$
Secundaire samendrukkingsindex C_α [-]	$8,2 \cdot 10^{-4}$
Grensspanning p_g [kPa]	87
Isotache parameters	
Samendrukkingsconstante bij ontlasten / herbelasten a [-]	$1,7 \cdot 10^{-3}$
Primaire samendrukkingsconstante bij belasten b [-]	$2,4 \cdot 10^{-2}$
Secundaire samendrukkingsconstante c [-]	$3,6 \cdot 10^{-4}$
Grensspanning p_g [kPa]	88
Overconsolidatie verhouding OCR [-]	1,16
Koppejan parameters	
Primaire samendrukkingsconstante, vóór grensspanning C_p [-]	170
Secundaire samendrukkingsconstante, vóór grensspanning C_s [-]	2000
Samendrukkingsconstante 10.000 dagen, vóór grensspanning C [-]	127
Primaire samendrukkingsconstante, na grensspanning C'_p [-]	45
Secundaire samendrukkingsconstante, na grensspanning C'_s [-]	865
Samendrukkingsconstante 10.000 dagen, na grensspanning C' [-]	37
Grensspanning p_g [kPa]	86
Consolidatie	
Consolidatiecoëfficiënt bij 80 kPa c_v [m ² /s]	$3,2 \cdot 10^{-6}$
Doorlatendheid bij 20 kPa k_v [m/s]	$1,0 \cdot 10^{-9}$
Doorlatendheid bij 320 kPa k_v [m/s]	$4,0 \cdot 10^{-10}$
Overige eigenschappen	
Coëfficiënt van horizontale gronddruk, neutraal K_0 [-]	0,33
Poisson's ratio ν [-]	0,19

Tabel D.2 Samendrukkings eigenschappen en overige eigenschappen van de Noordse leem.

D.2 Voorbeeld zettingsberekening

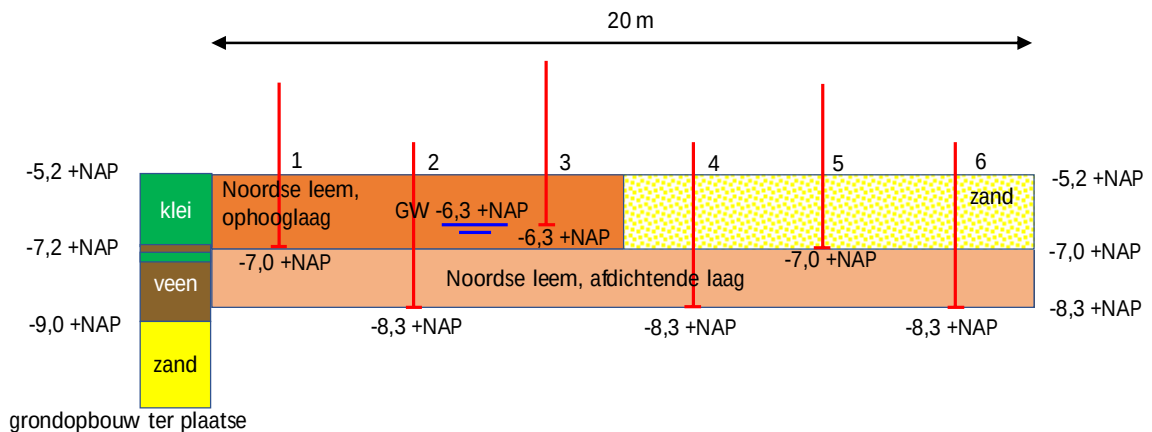
D.2.1 Proefvak

Noordse leem is toegepast in een proefvak als grondverbetering voor het bouwrijp maken van een terrein met 4 m slappe grond. Omdat bijna het hele pakket slappe lagen wordt vervangen, is het terrein daarna nagenoeg zettingsvrij. Vanwege de lage doorlatendheid van de Noordse leem is er geen contact tussen het oppervlaktewater en het water in het eerste watervoerend pakket.

De werkwijze was als volgt:

- Ontgraven van de slappe lagen tot ca. 0,7 m boven het pleistocene zand; om opbarsten te voorkomen is de ontgraving in den natte gebeurd.
- Plaatsen van zakbaken 2, 4 en 6 op de bodem van de ontgraving, zie Figuur D.1.
- Aanvullen van de ontgraving met 1,3 tot 2,0 m Noordse leem als afdichtende laag; de aanvulling is in den natte uitgevoerd.
- Plaatsen van zakbaken 1, 3 en 5 op de afdichtende laag Noordse leem, zie Figuur D.1.
- Aanvullen van de ontgraving tot het oorspronkelijke maaiveld, deels met Noordse leem, deels met ophoogzand; de aanvulling is in den natte uitgevoerd.

Figuur D.1 geeft de doorsnede door het proefvak.



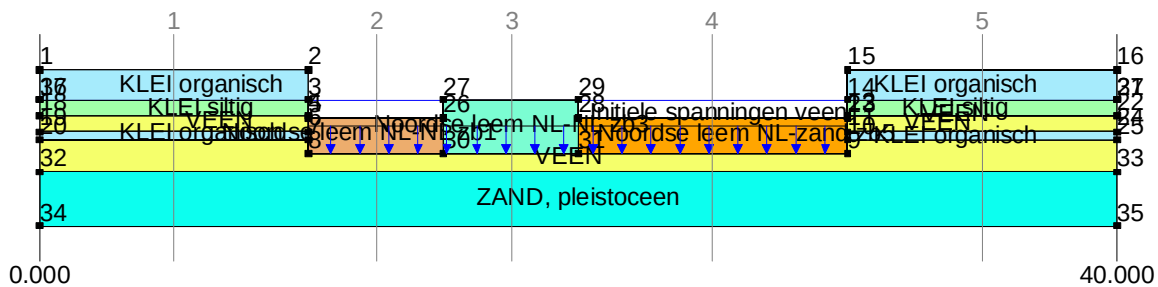
Figuur D.1 Opbouw van het proefvak met Noordse leem als grondverbetering.

De plaatsing van de zakbaken maakt het mogelijk de klink van de onderste laag Noordse leem te meten.

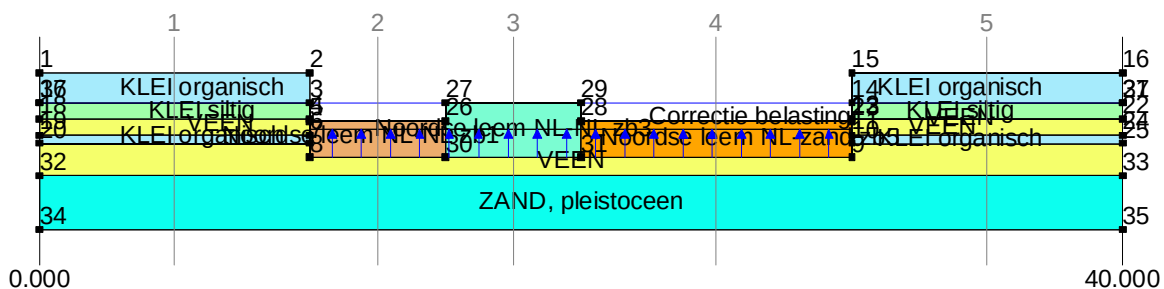
D.2.2 Zettingsberekeningen

Zettingsberekeningen voor het proefvak zijn uitgevoerd met het programma D-Settlement 19.1.

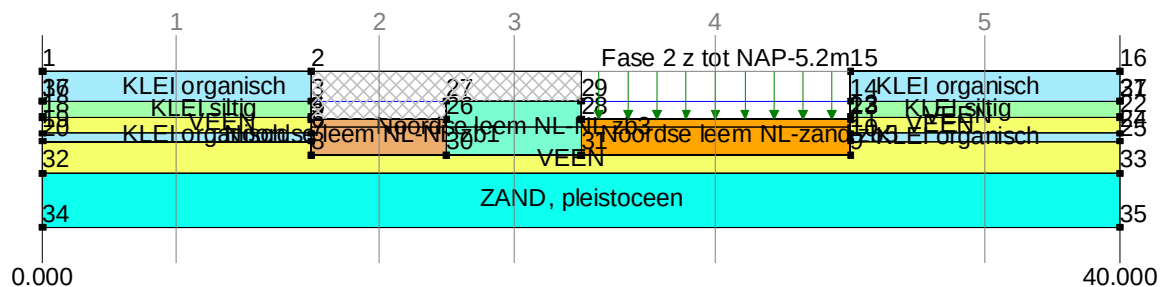
Figuur D.2 geeft de fasering van de berekening. De onderste laag Noordse leem is als grondlaag geschematiseerd om de klink te kunnen uitrekenen.



(a) Situatie na aanbrengen van eerste laag Noordse leem; om de correcte spanningen in de resterende veenlaag aan te brengen is een initiële belasting aangebracht.



(b) Wegnemen van de initiële belasting op $t=0$.



(c) Aanbrengen van de ophogingen op $t=0$, links de Noordse leem, rechts het ophoogzand.

Figuur D.2 Schematisatie van de zettingsberekeningen.

Materials

- Noordse leem NL-NL zb1
- Noordse leem NL-NL zb3
- Noordse leem NL-zand zb5
- KLEI siltig
- KLEI organisch
- VEEN
- ZAND, pleistoceen

De eigenschappen van de Noordse leem zijn ontleend aan Tabel D.1. De consolidatiecoëfficiënten van de Noordse leem in het linker deel van het proefvak met alleen Noordse leem zijn verlaagd. Omdat in de berekening de laag Noordse leem dunner is dan in werkelijkheid verloopt de consolidatie in de berekening sneller dan in werkelijkheid. Om dit te corrigeren zijn de consolidatiecoëfficiënten verlaagd met een factor gelijk aan het kwadraat van de laagdikte in de berekening gedeeld door de werkelijke laagdikte.

De eigenschappen van de veenlaag onder de Noordse leem zijn gegeven in Tabel D.3. De eigenschappen zijn ontleend aan de database met proefresultaten van Deltares.

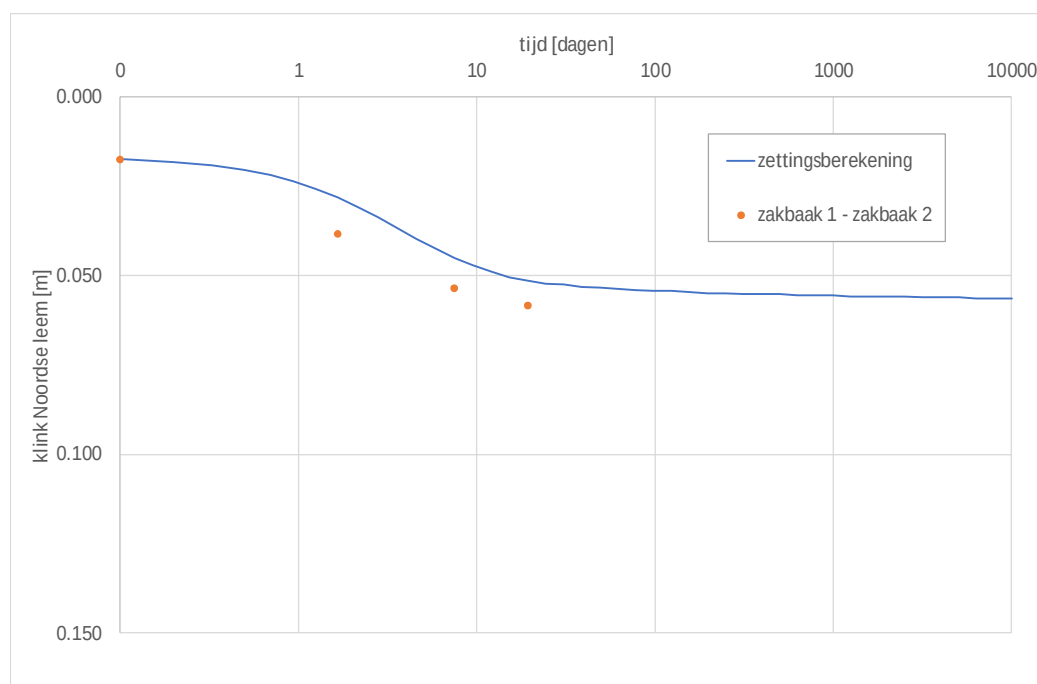
Parameter	Waarde
Isotache parameters	
Samendrukkingsconstante bij ontlasten / herbelasten a [-]	$2,6 \cdot 10^{-2}$
Primaire samendrukkingsconstante bij belasten b [-]	$2,9 \cdot 10^{-1}$
Secundaire samendrukkingsconstante c [-]	$2,0 \cdot 10^{-2}$
Overconsolidatie verhouding OCR [-]	2,03
Consolidatie	
Consolidatiecoëfficiënt c_v [m^2/s]	$2,0 \cdot 10^{-7}$

Tabel D.3 Samendrukkingseigenschappen van de veenlaag.

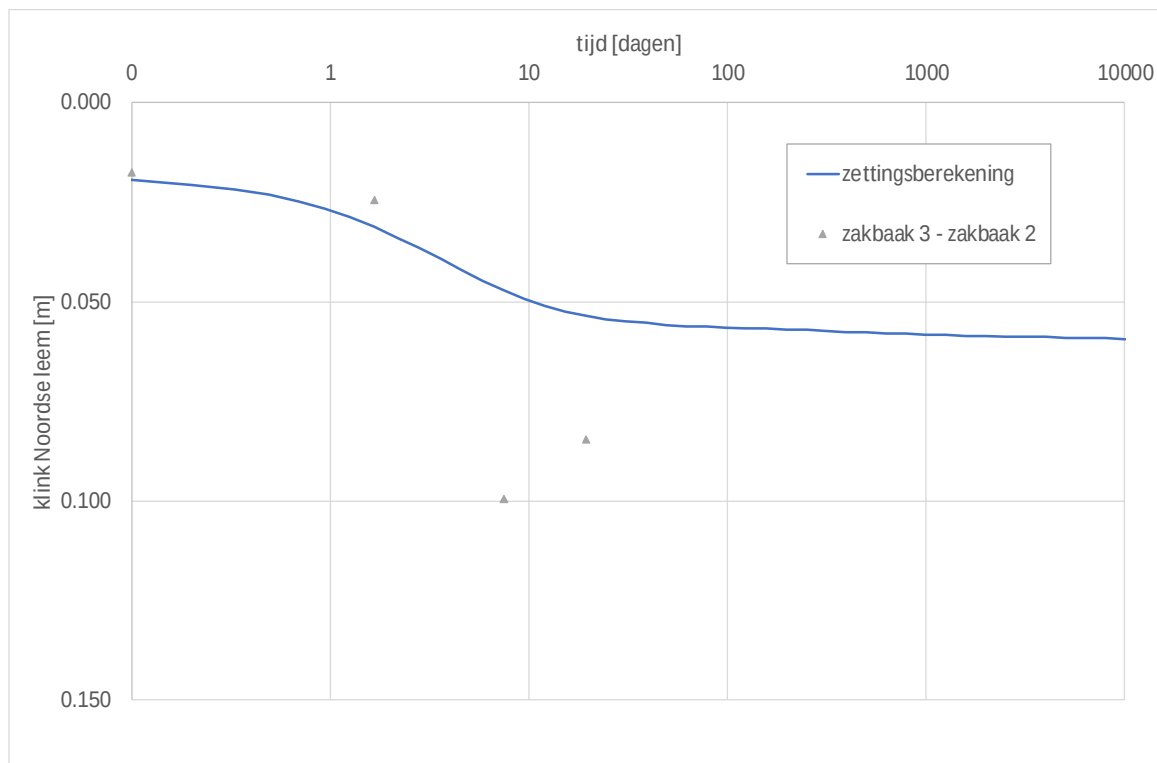
D.2.3 Resultaten

De volledige invoer- en uitvoer is gegeven in hoofdstuk D.3 van deze bijlage.

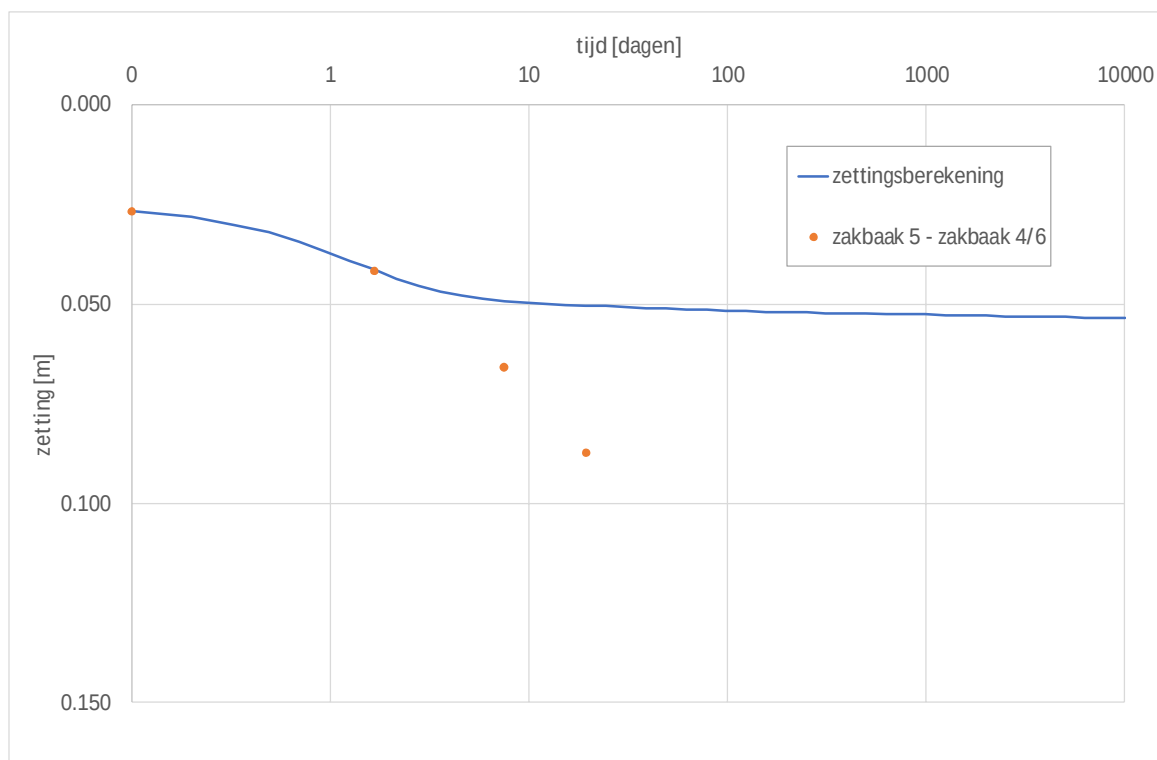
Figuur D.3 geeft de resultaten van de zakbaakmetingen en de zettingsberekeningen voor zakbaak 1-2 in het linker deel van het proefvak met de aanvulling uit Noordse leem. De klink van de Noordse leem is gelijk aan het verschil tussen de zakbaken 1 en 2. Figuur D.4 geeft de resultaten van de zakbaakmetingen en de zettingsberekeningen voor zakbaak 3-2 in het linker deel van het proefvak met de aanvulling uit Noordse leem. De klink van de Noordse leem is gelijk aan het verschil tussen de zakbaken 3 en 2. Figuur D.5 geeft de resultaten voor het rechter deel van het proefvak met de aanvulling uit ophoogzand. De klink van de Noordse leem is gelijk aan het verschil tussen de zakbaken 5 en het gemiddelde van zakbaken 4 en 6. De eerste zakbaakmeting op $t = 0$ is gelijk gesteld aan de zetting berekend op $t = 0,1$ dag.



Figuur D.3 Resultaten van de metingen en berekeningen voor het proefvak met de aanvulling uit Noordse leem, zakbaak 1-2.



Figuur D.4 Resultaten van de metingen en berekeningen voor het proefvak met de aanvulling uit Noordse leem, zakbaak 3-2.



Figuur D.5 Resultaten van de metingen en berekeningen voor het proefvak met de aanvulling uit ophoogzand, zakbaak 5-4/6.

In de figuren is te zien dat:

- De klink zeer snel optreedt in een tijdbestek van 1 à 2 weken. Dit blijkt uit de berekeningen en uit de verschilmetingen van zakbaken 1-2 in Figuur D.3. De verschilmetingen van de zakbaken 3 en 2 in Figuur D.4 en zakbaken 5 en 4/6 in Figuur D.5 laten geen uitvlakking van de klinksnelheid zien. Uit deze metingen is niet af te leiden of de klink een eindwaarde heeft bereikt of niet.
- De berekende klink van de Noordse leem over 30 jaar (10.000 dagen) is gering, in de orde van 0,05 – 0,06 m. Dit is circa 4% van de laagdikte. De berekende klink vanaf 2 weken na aanleg tot 30 jaar later is zeer gering en is in de orde van millimeters, tot maximaal 0,5 % van de laagdikte.
- De gemeten klink van de Noordse leem is groter dan de berekende klink; het verschil lijkt circa een factor 2 tot 3 te bedragen. Het verschil is mogelijk een gevolg van het aanbrengen in den natte. Hierdoor is de samendrukbaarheid van de Noordse leem mogelijk groter dan in de samendrukkingsproeven, die zijn uitgevoerd op materiaal dat in den droge is aangebracht.
- Indien een factor 3 tussen meting en berekening wordt gehanteerd is de totale klink van de Noordse leem over 30 jaar maximaal in de orde van 0,15 m, circa 10 % van de laagdikte. De klink vanaf 2 weken tot 30 jaar na aanleg zou aldus in de orde zijn van 0,01 m, circa 1 % van de laagdikte.

D.3 In- en uitvoer zettingsberekeningen

Report for D-Settlement 19.1

Settlement Calculations
Developed by Deltares



Company: Stichting Deltares

Date of report: 08/07/2019

Time of report: 14:49:24

Report with version: 19.1.1.23743

Date of calculation: 26/06/2019

Time of calculation: 11:51:02

Calculated with version: 19.1.1.23743

File name: N:\.\Voorbeeldberekening samendrukking 2019\Proefvak Maricke 3

Project identification: Toepassingsmogelijkheden Noordse leem
Proefvak Maricke
Geschatte cv-waarden, correctie NL-NL

1 Table of Contents

1 Table of Contents	2
2 Echo of the Input	3
2.1 Layer Boundaries	3
2.2 PI-lines	4
2.3 General Data	4
2.4 Soil Profiles	4
2.5 Soil Properties	5
2.6 Trapeziform Loads	6
2.7 Non-Uniform Loads	6
2.8 Verticals	6
3 Results per Vertical	7
3.1 Results for Vertical 1 (X = 5.00 m; Z = 0.00 m)	7
3.2 Results for Vertical 2 (X = 12.50 m; Z = 0.00 m)	7
3.3 Results for Vertical 3 (X = 17.50 m; Z = 0.00 m)	8
3.4 Results for Vertical 4 (X = 25.00 m; Z = 0.00 m)	8
3.5 Results for Vertical 5 (X = 35.00 m; Z = 0.00 m)	8
4 Settlements	10
4.1 Settlements	10

2 Echo of the Input

2.1 Layer Boundaries

Boundary number	Co-ordinates [m]				
14 - X -	0.000	10.000	10.000	10.000	10.000
14 - Y -	-5.200	-5.200	-6.300	-6.900	-7.000
14 - X -	15.000	15.000	20.000	20.000	30.000
14 - Y -	-7.000	-6.300	-6.300	-7.000	-7.000
14 - X -	30.000	30.000	30.000	30.000	40.000
14 - Y -	-6.902	-6.900	-6.300	-5.200	-5.200
13 - X -	0.000	10.000	10.000	10.000	15.000
13 - Y -	-6.300	-6.300	-6.900	-7.000	-7.000
13 - X -	15.000	20.000	20.000	30.000	30.000
13 - Y -	-6.300	-6.300	-7.000	-7.000	-6.902
13 - X -	30.000	30.000	30.000	40.000	
13 - Y -	-6.900	-6.300	-5.200	-5.200	
12 - X -	0.000	10.000	10.000	15.000	15.000
12 - Y -	-6.900	-6.900	-7.000	-7.000	-6.300
12 - X -	20.000	20.000	30.000	30.000	30.000
12 - Y -	-6.300	-7.000	-7.000	-6.902	-6.900
12 - X -	30.000	30.000	40.000		
12 - Y -	-6.300	-5.200	-5.200		
11 - X -	0.000	10.000	10.000	15.000	15.000
11 - Y -	-7.500	-7.500	-7.000	-7.000	-6.300
11 - X -	20.000	20.000	30.000	30.000	30.000
11 - Y -	-6.300	-7.000	-7.000	-6.902	-6.900
11 - X -	30.000	30.000	40.000		
11 - Y -	-6.300	-5.200	-5.200		
10 - X -	0.000	10.000	10.000	10.000	15.000
10 - Y -	-7.800	-7.800	-7.500	-7.000	-7.000
10 - X -	15.000	20.000	20.000	30.000	30.000
10 - Y -	-6.300	-6.300	-7.000	-7.000	-6.902
10 - X -	30.000	30.000	30.000	40.000	
10 - Y -	-6.900	-6.300	-5.200	-5.200	
9 - X -	0.000	10.000	10.000	15.000	15.000
9 - Y -	-7.800	-7.800	-8.300	-8.300	-7.000
9 - X -	15.000	20.000	20.000	30.000	30.000
9 - Y -	-6.300	-6.300	-7.000	-7.000	-6.902
9 - X -	30.000	30.000	30.000	40.000	
9 - Y -	-6.900	-6.300	-5.200	-5.200	
8 - X -	0.000	10.000	10.000	15.000	20.000
8 - Y -	-7.800	-7.800	-8.300	-8.300	-8.300
8 - X -	20.000	30.000	30.000	30.000	30.000
8 - Y -	-7.000	-7.000	-6.902	-6.900	-6.300
8 - X -	30.000	40.000			
8 - Y -	-5.200	-5.200			
7 - X -	0.000	10.000	10.000	15.000	20.000
7 - Y -	-7.800	-7.800	-8.300	-8.300	-8.300
7 - X -	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000
7 - Y -	-8.300	-7.800	-7.500	-7.000	-6.902
7 - X -	30.000	30.000	30.000	40.000	
7 - Y -	-6.900	-6.300	-5.200	-5.200	
6 - X -	0.000	10.000	10.000	15.000	20.000
6 - Y -	-7.800	-7.800	-8.300	-8.300	-8.300
6 - X -	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000
6 - Y -	-8.300	-7.800	-7.500	-7.000	-6.902
6 - X -	30.000	30.000	40.000		
6 - Y -	-6.900	-6.300	-6.300		
5 - X -	0.000	10.000	10.000	15.000	20.000
5 - Y -	-7.800	-7.800	-8.300	-8.300	-8.300
5 - X -	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000
5 - Y -	-8.300	-7.800	-7.500	-7.000	-6.902
5 - X -	30.000	40.000			

Boundary number	Co-ordinates [m]				
5 - Y -	-6.900	-6.900			
4 - X -	0.000	10.000	10.000	15.000	20.000
4 - Y -	-7.800	-7.800	-8.300	-8.300	-8.300
4 - X -	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000
4 - Y -	-8.300	-7.800	-7.500	-7.000	-6.902
4 - X -	40.000				
4 - Y -	-6.900				
3 - X -	0.000	10.000	10.000	15.000	20.000
3 - Y -	-7.800	-7.800	-8.300	-8.300	-8.300
3 - X -	30.000	30.000	30.000	40.000	
3 - Y -	-8.300	-7.800	-7.500	-7.500	
2 - X -	0.000	10.000	10.000	15.000	20.000
2 - Y -	-7.800	-7.800	-8.300	-8.300	-8.300
2 - X -	30.000	30.000	40.000		
2 - Y -	-8.300	-7.800	-7.800		
1 - X -	0.000	40.000			
1 - Y -	-9.000	-9.000			
0 - X -	0.000	40.000			
0 - Y -	-11.000	-11.000			

2.2 PI-lines

PI-line number	Co-ordinates [m]				
1 - X -	0.000	40.000			
1 - Y -	-6.300	-6.300			

2.3 General Data

Soil model:	Isotache
Consolidation model:	Darcy
Strain model:	Natural
Groundwater level:	Initial determined by PI-line number 1
Unit weight of water:	9.81 [kN/m³]
Stress distribution	
- Soil:	Buisman
- Loads:	None
End of consolidation:	10000.00 [days]
No maintain profile	
Creep rate reference time:	1.000 [days]
No imaginary surface	
With submerging	
(only for non uniform loads)	
- Iteration stop criterium :	0.10 [m]
Load column width	
- Non-Uniform Loads :	1.00 [m]
- Trapeziform Loads :	1.00 [m]

2.4 Soil Profiles

Layer number	Material name	PI-line top	PI-line bottom
14	KLEI organisch	1	1
13	KLEI siltig	1	1
12	VEEN	1	1
11	KLEI organisch	1	1
10	Noordse leem NL-N...	1	1
9	Noordse leem NL-N...	1	1
8	Noordse leem NL-z...	1	1
7	KLEI organisch	1	1
6	KLEI siltig	1	1
5	VEEN	1	1
4	VEEN	1	1
3	KLEI organisch	1	1
2	VEEN	1	1
1	ZAND, pleistoceen	1	1

2.5 Soil Properties

Layer number	Drained	Unit weight	
		Unsaturated [kN/m³]	Saturated [kN/m³]
14	No	13.00	13.00
13	No	15.00	15.00
12	No	11.00	11.00
11	No	13.00	13.00
10	No	19.70	19.70
9	No	19.70	19.70
8	No	19.70	19.70
7	No	13.00	13.00
6	No	15.00	15.00
5	No	11.00	11.00
4	No	11.00	11.00
3	No	13.00	13.00
2	No	11.00	11.00
1	Yes	18.00	20.00

Layer number	Storage type	Vert. consolid. coefficient Cv [m²/s]	Vertical permeability [m/s]	Permeability strain mod. [-]	Initial vertical permeability [m/s]
14	Vert. cons.	1.00E-08	-	-	-
13	Vert. cons.	5.00E-08	-	-	-
12	Vert. cons.	2.00E-07	-	-	-
11	Vert. cons.	1.00E-08	-	-	-
10	Vert. cons.	5.63E-07	-	-	-
9	Vert. cons.	1.33E-06	-	-	-
8	Vert. cons.	3.20E-06	-	-	-
7	Vert. cons.	1.00E-08	-	-	-
6	Vert. cons.	5.00E-08	-	-	-
5	Vert. cons.	2.00E-07	-	-	-
4	Vert. cons.	2.00E-07	-	-	-
3	Vert. cons.	1.00E-08	-	-	-
2	Vert. cons.	2.00E-07	-	-	-
1	Vert. cons.	-	-	-	-

Layer number	POP [kN/m²]	OCR [-]	Equiv. age [days]
14	-	1.82	-
13	-	1.68	-
12	-	2.03	-
11	-	1.82	-
10	-	1.16	-
9	-	1.16	-
8	-	1.16	-
7	-	1.82	-
6	-	1.68	-
5	-	2.03	-
4	-	2.03	-
3	-	1.82	-
2	-	2.03	-
1	-	1.10	-

Layer number	Secondary swelling type	Secondary swelling factor[-]	Unloading stress ratio[-]
14	Full	-	-
13	Full	-	-
12	Full	-	-
11	Full	-	-
10	Full	-	-
9	Full	-	-
8	Full	-	-

Layer number	Secondary swelling type	Secondary swelling factor[-]	Unloading stress ratio[-]
7	Full	-	-
6	Full	-	-
5	Full	-	-
4	Full	-	-
3	Full	-	-
2	Full	-	-
1	Full	-	-

Layer number	Reloading/ swelling const. a [-]	Primaire comp. index b [-]	Secondary compr. const c [-]
14	1.540E-02	2.000E-01	1.200E-02
13	9.600E-03	1.300E-01	6.800E-03
12	2.640E-02	2.900E-01	2.030E-02
11	1.540E-02	2.000E-01	1.200E-02
10	1.700E-03	2.400E-02	3.600E-04
9	1.700E-03	2.400E-02	3.600E-04
8	1.700E-03	2.400E-02	3.600E-04
7	1.540E-02	2.000E-01	1.200E-02
6	9.600E-03	1.300E-01	6.800E-03
5	2.640E-02	2.900E-01	2.030E-02
4	2.640E-02	2.900E-01	2.030E-02
3	1.540E-02	2.000E-01	1.200E-02
2	2.640E-02	2.900E-01	2.030E-02
1	1.000E-06	1.000E-05	1.000E-06

2.6 Trapeziform Loads

Load number	Time [days]	Unit weight [kN/m³]	Dimensions					
			Height [m]	Left [m]	Middle [m]	Right [m]	X [m]	Y [m]
1	-1	7.00	1.00	0.00	20.00	0.00	10.00	-8.30
2	0	-7.00	1.00	0.00	20.00	0.00	10.00	-8.30

2.7 Non-Uniform Loads

Load number	Time [days]	Unit weight	
		Unsaturated [kN/m³]	Saturated [kN/m³]
1	0	19.70	19.70
2	0	17.00	19.00

Load number	Co-ordinates [m]						
1 - X -	10.00	20.00	20.00				
1 - Y -	-5.20	-5.20	-6.30				
2 - X -	20.00	20.00	30.00				
2 - Y -	-6.30	-5.20	-5.20				

2.8 Verticals

Vertical number	X co-ordinates [m]					
1 - 5	5.000	12.500	17.500	25.000	35.000	

Discretisation = 100

3 Results per Vertical

3.1 Results for Vertical 1 (X = 5.00 m; Z = 0.00 m)

Depth [m]	Effective Stress [kPa]	Hydraulic head [m]	Loading [kPa]	Settlement [m]
-5.200	0.001	-5.200	0.000	0.037
-5.300	1.299	-5.300	0.000	0.036
-5.400	2.598	-5.400	0.000	0.035
-5.500	3.895	-5.499	0.000	0.034
-5.600	5.192	-5.599	0.000	0.033
-5.700	6.488	-5.699	0.000	0.032
-5.750	7.136	-5.749	0.000	0.032
-5.800	7.783	-5.798	0.000	0.032
-5.900	9.079	-5.898	0.000	0.031
-6.000	10.374	-5.997	0.000	0.030
-6.100	11.670	-6.097	0.000	0.029
-6.200	12.965	-6.196	0.000	0.028
-6.300	14.029	-6.296	-0.232	0.028
-6.300	14.030	-6.296	-0.232	0.028
-6.600	15.584	-6.296	-0.232	0.027
-6.900	17.139	-6.296	-0.232	0.025
-6.900	17.139	-6.296	-0.232	0.025
-7.200	17.496	-6.296	-0.232	0.022
-7.500	17.854	-6.296	-0.231	0.018
-7.500	17.854	-6.296	-0.231	0.018
-7.650	18.349	-6.297	-0.230	0.017
-7.800	18.846	-6.299	-0.228	0.016
-7.800	18.846	-6.299	-0.228	0.016
-8.400	19.591	-6.299	-0.201	0.008
-9.000	20.389	-6.300	-0.125	0.000
-9.000	20.389	-6.300	-0.125	0.000
-10.000	30.876	-6.300	0.158	0.000
-11.000	41.579	-6.300	0.614	0.000

3.2 Results for Vertical 2 (X = 12.50 m; Z = 0.00 m)

Depth [m]	Effective Stress [kPa]	Hydraulic head [m]	Loading [kPa]	Settlement [m]
-7.000	26.887	-6.300	26.886	0.182
-7.100	27.880	-6.300	26.891	0.173
-7.200	28.878	-6.300	26.900	0.166
-7.300	29.880	-6.300	26.913	0.161
-7.400	30.885	-6.300	26.930	0.156
-7.500	31.893	-6.300	26.950	0.151
-7.600	32.903	-6.300	26.970	0.147
-7.650	33.407	-6.300	26.980	0.145
-7.700	33.910	-6.300	26.990	0.143
-7.800	34.915	-6.300	27.006	0.139
-7.900	35.915	-6.300	27.017	0.136
-8.000	36.908	-6.300	27.021	0.133
-8.300	39.828	-6.300	19.975	0.126
-8.300	39.828	-6.300	19.975	0.126
-8.650	40.056	-6.300	19.786	0.062
-9.000	40.133	-6.300	19.450	0.000
-9.000	40.133	-6.300	19.450	0.000
-10.000	48.752	-6.300	18.021	0.000
-11.000	57.107	-6.300	16.519	0.000

3.3 Results for Vertical 3 (X = 17.50 m; Z = 0.00 m)

Depth [m]	Effective Stress [kPa]	Hydraulic head [m]	Loading [kPa]	Settlement [m]
-6.300	20.386	-6.300	20.385	0.131
-6.400	21.374	-6.300	20.385	0.123
-6.500	22.361	-6.300	20.383	0.117
-6.600	23.343	-6.300	20.376	0.111
-6.700	24.315	-6.300	20.359	0.107
-6.800	25.272	-6.300	20.328	0.103
-6.900	26.211	-6.300	20.279	0.099
-7.000	27.133	-6.300	20.211	0.096
-7.100	28.037	-6.300	20.127	0.093
-7.200	28.929	-6.300	20.030	0.090
-7.300	29.811	-6.300	19.923	0.087
-8.300	38.933	-6.300	12.158	0.072
-8.300	38.933	-6.300	12.158	0.072
-8.650	39.358	-6.300	12.166	0.036
-9.000	39.905	-6.300	12.292	0.000
-9.000	39.905	-6.300	12.292	0.000
-10.000	50.775	-6.300	12.976	0.000
-11.000	61.640	-6.300	13.668	0.000

3.4 Results for Vertical 4 (X = 25.00 m; Z = 0.00 m)

Depth [m]	Effective Stress [kPa]	Hydraulic head [m]	Loading [kPa]	Settlement [m]
-7.000	23.886	-6.300	23.885	0.167
-7.100	24.875	-6.300	23.886	0.158
-7.200	25.864	-6.300	23.887	0.152
-7.300	26.855	-6.300	23.888	0.146
-7.400	27.845	-6.300	23.890	0.141
-7.500	28.837	-6.300	23.893	0.137
-7.600	29.829	-6.300	23.896	0.133
-7.650	30.325	-6.300	23.898	0.131
-7.700	30.821	-6.300	23.900	0.129
-7.800	31.815	-6.300	23.904	0.126
-7.900	32.808	-6.300	23.908	0.123
-8.000	33.801	-6.300	23.913	0.120
-8.300	36.781	-6.300	16.926	0.114
-8.300	36.781	-6.300	16.926	0.114
-8.650	37.205	-6.300	16.934	0.056
-9.000	37.615	-6.300	16.926	0.000
-9.000	37.615	-6.300	16.926	0.000
-10.000	47.635	-6.300	16.770	0.000
-11.000	57.401	-6.300	16.405	0.000

3.5 Results for Vertical 5 (X = 35.00 m; Z = 0.00 m)

Depth [m]	Effective Stress [kPa]	Hydraulic head [m]	Loading [kPa]	Settlement [m]
-5.200	0.001	-5.200	0.000	0.036
-5.300	1.299	-5.300	0.000	0.036
-5.400	2.598	-5.400	0.000	0.035
-5.500	3.895	-5.499	0.000	0.034
-5.600	5.192	-5.599	0.000	0.033

Depth [m]	Effective Stress [kPa]	Hydraulic head [m]	Loading [kPa]	Settlement [m]
-5.700	6.488	-5.699	0.000	0.032
-5.750	7.136	-5.749	0.000	0.032
-5.800	7.783	-5.798	0.000	0.032
-5.900	9.079	-5.898	0.000	0.031
-6.000	10.374	-5.997	0.000	0.030
-6.100	11.670	-6.097	0.000	0.029
-6.200	12.965	-6.196	0.000	0.028
-6.300	14.030	-6.296	-0.231	0.028
-6.300	14.030	-6.296	-0.231	0.028
-6.600	15.584	-6.296	-0.231	0.027
-6.900	17.139	-6.296	-0.231	0.025
-6.900	17.139	-6.296	-0.231	0.025
-6.901	17.140	-6.296	-0.231	0.025
-6.901	17.140	-6.296	-0.231	0.025
-6.901	17.140	-6.296	-0.231	0.025
-7.200	17.497	-6.296	-0.231	0.022
-7.500	17.855	-6.296	-0.231	0.018
-7.500	17.855	-6.296	-0.231	0.018
-7.650	18.348	-6.297	-0.230	0.017
-7.800	18.846	-6.299	-0.228	0.016
-7.800	18.846	-6.299	-0.228	0.016
-8.400	19.586	-6.299	-0.206	0.008
-9.000	20.374	-6.300	-0.140	0.000
-9.000	20.374	-6.300	-0.140	0.000
-10.000	30.826	-6.300	0.108	0.000
-11.000	41.473	-6.300	0.508	0.000

4 Settlements

4.1 Settlements

Vertical number	X co-ordinate [m]	Z co-ordinate [m]	Surface level [m]	Settlement [m]
1	5.00	0.00	-5.20	0.037
2	12.50	0.00	-7.00	0.182
3	17.50	0.00	-6.30	0.131
4	25.00	0.00	-7.00	0.167
5	35.00	0.00	-5.20	0.036

End of Report